LED-valaistuksen takaisinmaksuaika

FINTRAS OY

Jarkko Koivula

Opinnäytetyö
Toukokuu 2013
Talotekniikka
Sähköinen talotekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikka
Sähköinen talotekniikka

Jarkko Koivula
LED-valaistuksen takaisinmaksuaika
Fintras Oy

Opinnäytetyö 85 sivua, joista liitteitä 26 sivua
Toukokuu 2013

Työn tarkoitus on toteuttaa laskentatyökalu takaisinmaksuajan määrittämiseen LED-valaistusratkaisuille sekä rakentaa johdonmukainen valaistusopas koulutusmateriaaliksi Fintras Oy:n käyttöön. Työssä käsitellään valonlähteiden elinkaarikustannuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä sekä valaistuksen energiatehokkuutta. Valaistusoppaaseen on kerätty tietoa valon teoriasta sekä siihen liittyvät keskeiset laskentakaavat. Oppaassa käsitellään lisäksi näkemisen perusteita sekä tutkitaan valonlähteen pintakirkkauden suhdetta valaistusvoimakkuuteen. Työn tavoitteena on luoda takaisinmaksuajan laskentatyökalu päivittäiseen käyttöön niin asiakastapaamisiin kuin sähköisten tarjousten liitteeksi. Valaistusopas tukee sisällöltään laskentatyökalun käyttöä sekä kertoo lukijalle, mistä valaistuksessa on kyse ja mitä tämän päivän tekniikasta tulee tietää.

Laskentatyökalulla tähän asti lasketut takaisinmaksuajat ovat olleet vertailukelpoisia ja uusien valaisimien päivitys luetteloon onnistuu helposti. Työntekijöiden ensimmäiset testaukset ovat osoittautuneet positiivisiksi ja työkalun käyttö on koettu helpoksi omaksua. Asiakkaat ovat mieltäneet työkalun helpoksi tavaksi havainnollistaa hankinnan kannattavuus. Kehitystyö jatkuu lähitulevaisuudessa edelleen ja työkalun ominaisuuksia muokataan vastaamaan paremmin markkinoinnin tarpeita.

Koska absoluuttisia elinkaarikustannuksia valonlähteelle on hyvin vaikea arvioida, joudutaan uudistettavan valaistuksen kustannuksissa luottamaan taulukkoarvoihin tai suorittamaan laskenta asiakkaan ilmoittamilla tiedoilla. Tämä vaikuttaa pitkällä aikavälillä huomattavasti kustannuskertymään, mutta lyhyillä takaisinmaksuajoilla heitto on vähäistä. Työkalun heikkouksina laskentalogiikka ei huomio liitäntälaitteiden tehohäviöitä eikä ohjauksen vaikutusta energiankulutukseen.

Asiasanat: valaistuksen takaisinmaksuaika, elinkaarikustannukset,

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Building services
Electrical building services

Jarkko Koivula
Repayment period for LED-lighting solution
Fintras Oy

Bachelor's thesis 85 pages, appendices 26 pages
May 2013

The agenda for this thesis is to create calculation tool to estimate the return on investment period for LED- lighting solutions and to create logical training manual about lighting for Fintras Oy. The thesis is about life-cycle costs of light sources, the factors taking effecting on them and energy efficiency. The manual contains information about the basic principles of how light behaves and the essential calculation formulas. In addition, there is also information about how does the human eye process light and also research notes about how the surface brightness of the light source effects on the illuminance.

The calculation tool should be made use of in daily basis demonstrations with clients and also to work as attachments to emailed propositions. The lighting manual supports the use of the calculation tool and also educates the reader with all the relevant information about basic principles of lighting and gets the reader up to date with the latest technology. The calculated return on investment periods have so far been comparable and adding new products to the list is simple. The first field tests that have been performed by the company's employees have come out positive and use of the tool is easy to learn. The clients also feel that the tool is clear way to observe the viability of investing into new equipment. The research and development is ongoing and the properties of the tool are being continually improved to match the needs of marketing.

It is challenging to make exact lifespan calculations for lighting sources, so when calculating costs for new lighting equipment the company has to rely on the on chart values or the information provided by the client. This will significantly effect on accumulation of costs in the long run, but when the return on investment period is short, the effect is marginal. The calculation tool does not consider the dissipation caused by add-on devices nor the effect of control to power consumption.

Key words: repayment period for light source, life-cycle costs

SISÄLLYS

LYHENTEET JA TERMIT

I	Valovoima, cd
Φ	Valovirta, lm
E	Valaistusvoimakkuus, lx
L	Luminanssi, cd/m^2
λ	Aallonpituus, nm
A	Pinta-ala, m^2
K	Kontrasti
ρ	Materiaalin heijastuskerroin, 0-1 tarkoittaa prosenttilukua 0-100%
I	Intensiteetti, W/nm
R_a	Värintoistoindeksi, 0-1 tarkoittaa prosenttilukua 0-100%
UV	Ultravioletti, ultraviolettisäteily, nm
IR	Infrapuna, lämpösäteily, nm
EuP	Sähkölaitteiden energiadirektiivi (engl. Energy Using Products)
LCC	Elinkaarikustannukset (engl. Life Cycle Costs)
LENI	Energiatehokkuuden indeksi (engl. Lighting Energy Numeric Indicator)
EEI	Energiatehokkuusindeksi (engl. Energy Efficiency Index)
LLMF	valovirran alenema (engl. Lamp Lumen Maintenance Factor)
HPS	Suurpainenatrium (engl. High Pressure Sodium)
HID	Suurpaineiset purkauslamput (engl. High Intesity Discharge)
LED	Hohtodiodi (engl. Light Emitting Diode)
SFS-EN 12464-1-2011	Sisävalaistus standardi
SFS-EN12193-2008	Urheilutilojen valaistus standardi
SFS-EN 15193	Rakennusten ja valaistuksen energiankulutus standardi

1 JOHDANTO

LED-valaistusratkaisut ovat yleistymässä hurjaa vauhtia valaistuksen, joka osa-alueella ja tulevat lähivuosina korvaamaan suurenosan muun muassa purkaus- ja loistevalaisin tekniikasta. LEDit valonlähteenä ovat todella monikäyttöisiä ja tutkittavaa niiden elinkaarikustannusten ympärillä riittää. Työ tehdään LED-valaistukseen erikoistuneelle Fintras Oy:lle, joka tuottaa itse markkinoille erityyppisiä LED-valaisimia ja -valaistusratkaisuja. Yritys on perustettu vuonna 2005 ja työn ohjauksesta vastaa Ylöjärven toimipisteellä työskentelevä kehitysjohtaja Esa Sointula ja tuotekehityksestä vastaava Kimmo Leskinen. Esa Sointula on ollut perustamassa Fintras-yhtiötä ja on yksi kantavista voimista myös innovoinnin ja LED-tuotekehityksen saralla.

Työntarkoituksena on toteuttaa laskentatyökalu LED-valaistusratkaisun takaisinmaksuajan määritykseen. Laskentalogiikkaa voidaan hyödyntää myynnin tukena asiakaskäynneillä ja sähköisten tarjousten perustana. Suurin ongelma LED-valaistusratkaisuissa ovat korkeat hankintakustannukset, joten takaisinmaksuajan määrittäminen investoinnille on mainio keino havainnollistaa asiakkaalle tulevaisuudessa saatavat säästöt sekä uudistuksen kannattavuus. Laskennassa on tarkoitus huomioida olemassa olevan valaistuksen kunnossapito- ja energiakustannukset ja verrata niitä LEDillä toteutettavaan valaistusratkaisuun. Takaisinmaksuaikavertailuun on mahdollista lisätä myös kilpaileva tarjous, mikäli tämän yksityiskohdat ovat tiedossa. Tavoitteena on luoda toimiva työkalu myyntihenkilöstön päivittäiseen käyttöön, jota on selkeä käyttää, helppo muokata ja nopea päivittää uusien tuotteiden saapuessa. Sen avulla voidaan selkeästi esittää asiakkaalle onko LED-valaistusratkaisu kohteessa järkevä ja millä valaisinyhdistelmillä se on taloudellisinta toteuttaa. Työkalun käytöllä pyritään nopeuttamaan myös sähköisen tarjouksen laatimista.

Tampereen ammattikorkeakoulun kirjallisessa osiossa keskitytään valaistuksen elinkaarikustannuksiin sekä takaisinmaksutyökalun toteutukseen. Työkalun tueksi sekä koulutusmateriaaliksi opinnäytetyön koottiin valaistusopas. Valaistusopas lisättiin työn liitteisiin.

2 VALAISTUSOPAS

Valaistusopasta lähdettiin suunnittelemaan käsikirjaksi, johon on kerätty tiivis tietopaketti valosta ja valaistuksesta tukemaan sisällöltään takaisinmaksutyökalun käyttöä. Siitä tulisi löytyä tarvittavat aineistot tuotekehityksen käyttöön ja myynnin koulutusmateriaaliksi. Valaistusopas suunniteltiin koostuvan seuraavista osioista:

- valon teoria ja laskukaavat
- näkemisen perusteet ja valonlähteen vaikutus näköhavaintoon
- tietopaketti LEDien kanssa kilpailevista yleisvalonlähteistä
- valonlähteiden sähköiset ominaisuudet
- energiatehokkuuden vaatimukset valaistusratkaisuille
- pintakirkkauden vaikutus valaistusvoimakkuuteen
- takaisinmaksutyökalun esittely

Valaistusopas lisättiin työhön liitteeksi numero 1. Materiaalin laajuuden vuoksi sitä ei haluttu yhdistää opinnäytetyön elinkaariosioon, vaan säilyttää se omana kokonaisuutenaan.

2.1. Valon teoria

Luvussa esitellään oleellisimmat valosuureet ja niiden laskennassa käytettävät kaavat laskuesimerkkien avulla. Lisäksi syvennytään valonlähteen valo-ominaisuuksiin ja kuinka valmistajat niitä kuvaavat.

2.2. Näkemisen perusteet

Näkemisen osiossa perehdyttiin esittelemään näköelin ja sen monimutkainen toiminta yleisellä tasolla. Koska silmään saapuvan valon ominaisuudet ja ympäröivän tilan valaistustaso saavat aikaan erilaisen näköhavainnon, pyrittiin näitä riippuvuuksia ja ilmiöitä selittämään lukijalle. Osiossa havainnollistetaan myös silmän rakennetta ja näköhavainnon muodostumisen eri vaiheet. Tarkoituksena oli läpikäydä ne osiot näkemisestä, johon valonlähteen valinnalla voidaan vaikuttaa. Aiheen rajauksen vuoksi valon einäköaistimusta synnyttävien vaikutusten käsittelyä ei osioon katsottu tarpeelliseksi.

2.3. Valonlähteet

Oppaaseen koottiin tietoa LEDin kanssa kilpailevista valonlähteistä sekä niiden ominaisuuksista. Tarkoituksena oli kerätä perustietopaketti, jolla tietotaitoa voidaan päivittää ja LEDin vahvuuksia ja heikkouksia analysoida yleisvalonlähteenä. Materiaalitulvan vuoksi aineistoa oli hyvin työlästä kerätä ja joukosta poimia tuorein ja luotettavin tieto. Vertailukohtana valonlähteille käytettiin 100- ja 200- Wattista LED-syväsäteilijää, joten kaasupurkaus- ja loistelampuista kerättiin materiaalia tässä kokoluokassa käytettävistä vaihtoehdoista. Rikkiplasmatekniikasta ja elohopeavapaasta induktiotekniikasta oli tarkoitus julkaista tietopaketti, mutta maahantuojat sekä jälleenmyyjät eivät luovuttaneet materiaaliaan tutkimuskäyttöön. Suurin osa muita valonlähteitä koskevasta materiaalista saatiin kerättyä suurten valaisinvalmistajien kotisivuilta, tuoteluetteloista ja heidän painetuista julkaisuistaan. Lisäksi lähteinä toimivat valaistuskirjallisuus sekä Tampereen ammattikorkeakoulun opetusmateriaalit.

2.4. Valonlähteiden sähköiset ominaisuudet

Valonlähteiden sähköisissä ominaisuuksissa havainnollistettiin miltä erilaiset valaisinkuormat näyttävät sähköverkkoon päin ja mistä niiden ottama sähköteho koostuu. Osiossa esiteltiin sähkötehon komponentit ja tehokertoimen tarkoitus, mitä tarkoittaa epälineaarinen valaistuskuorma sekä miten sen vaikutuksia voidaan sähköverkkoon minimoida. Sen lisäksi osiossa sivuttiin hakkuriteholähteiden tuottamien yliaaltojen vaikutuksia.

2.5. Valaistuksen energiatehokkuus

Valaistuksen energiatehokkuudessa otettiin kantaa, mikä on valaistuksen energiankulutuksen säästöpotentiaali ”Business to Business”-markkinoilla. Teollisuuden, suurten yrityskiinteistöjen, tieliikenteen ja julkisensektorin vanhaa valaisinkantaa on aika uudistaa energiatehokkaammaksi. LED-valonlähteenä tarjoaa mahdollisuuden mittaviin säästöihin jo pelkillä valaisinuudistuksilla. Koska Fintras Oy toimii pääasiassa LED-valaisinten maahantuojana ja -valmistajana, oppaassa ei haluttu keskittyä ohjauksen tuomiin mahdollisuuksiin energiansäästössä. Pääpaino oli tarkastella eritoten LED-

valonlähde valinnoilla saatavia säästöjä saneerauskohteissa ja uudiskohteissa kilpaileviin valonlähteisiin verrattuna. Valaistuksen energiankulutukselle on hankala sanoa tarkkoja arvoja, koska sitä mitataan vielä harvassa kiinteistössä. Energiatehokkuuden osiossa sivuttiin standardia EN 15193, joka käsittelee kiinteän valaistuksen energiankulutusta erilaisissa rakennuksissa. Sen avulla voidaan määrittää rakennuksen valaistukselle esimerkiksi LENI-indeksi ja todeta laskennallisesti missä, energiankäyttöluokassa liikutaan.

2.6. Pintakirkkauden suhde valaistusvoimakkuuteen

Fintras Oy:n tuotekehityksen toivomus oli käsitellä oppaassa vielä valaisimen pintakirkkauden suhdetta tilaan saatavaan valaistusvoimakkuuteen. Tähän osioon kerättiin keskeiset kaavat ja lait, joiden avulla riippuvuutta voidaan arvioida erityyppisestä valonlähteestä, eri etäisyyksillä ja eri kulmissa. Jos pintakirkkausmittarilla otetaan esimeriksi LED-paneelin pinnasta luminanssin arvo X cd/m^2, voidaan taulukkolaskennan avulla arvioida eri etäisyyksille saatavat valaistusvoimakkuudet lukseina. Ratkaisut perustuivat yksinkertaiseen neliölain ja kosinilain soveltamiseen.

2.7. Takaisinmaksutyökalu

Takaisinmaksutyökalun osiossa esitellään laskennan logiikka käytännön esimerkkitapauksella. Siinä selostetaan myös tulokseen vaikuttavat tekijät ja kuinka vertailuun voidaan yhdistää myös kilpailevan valaistusratkaisun tarjous. Laskentatyökalu on saatettu koekäyttöön, joten sen toimintoja tullaan kehittämään käyttäjä kokemusten perusteella myös jatkossa. Taulukossa 1 on esitetty takaisinmaksutyökalun käyttöliittymä suunnitteluvaiheessa.

TAULUKKO 1. Takaisinmaksutyökalun

FINTRAS Led Valaisin
Puh.044 500 6522
etunimi.sukunimi@fintras.fi

HELSINKI	YLÖJÄRVI	LAHTI
Hakuninmaantie 5	Menotie 1	Karjalankatu 37
00430 HELSINKI	33470 YLÖJÄRVI	151500 LAHTI

1	TILAN VAATIMUKSET	VANHA	UUSI	Yksikkö
	Valaistusvoimakkuus	300	500	lux

2	LED-VALAISINTEN INVESTOINTIKUSTANNUKSET	MÄÄRÄ (KPL)	HINTA (€)	Teho (kW)
	DL-10/09LED	20	1140,00	0,20
	IL-A100/26LED	8	2082,40	0,80
	FL-B70/34LED	10	2362,00	0,70
	TL-40/42LED	20	2720,00	0,80
	TYHJÄ	0	0,00	0,00
	TYHJÄ	0	0,00	0,00
	YHTEENSÄ:	58	8304,4	2,50

ASENNUS

3	KÄYTTÖ JA KUORMA		VANHA	UUSI	Yksikkö
	Käyttöpäiviä vuodessa	270			vrk
	Paloaika päivässä	16			h
	Yhteensä tuntia vuodessa	4320			h
	Valaisinkuorma		7,0	2,5	kW
	Valaistuksen kokonaiskulutus		30049,92	10800	kWh

VANHA VALAISINKUORMA	
T8	Lampputyyppi
A3	EEI-luokka
2x58W	TEHO
60	Valaisinten lukum.
6960	KUORMA (W)

4	ENERGIANKULUTUS	Hinta snt/kWh	VANHA €	UUSI €	SÄÄSTÖ €
	Siirto	5,00			
	Sähköenergia	8,00			
	Tunti kulutus		0,90	0,33	0,58
	Päivä kulutus		14,47	5,20	9,27
	Vuosi kulutus		3906,49	1404,00	2502,49
	Vuotuinen korotus	2,60 %			
	VUOSI 1	2,60 %	4008,06	1440,50	2567,55
	VUOSI 2	2,60 %	4112,27	1477,96	2634,31
	VUOSI 3	2,60 %	4219,19	1516,38	2702,80
	VUOSI 4	2,60 %	4328,89	1555,81	2773,08
	VUOSI 5	2,60 %	4441,44	1596,26	2845,18
	VUOSI 6	2,60 %	4556,91	1637,76	2919,15
	VUOSI 7	2,60 %	4675,39	1680,35	2995,05
	VUOSI 8	2,60 %	4796,95	1724,03	3072,92
	VUOSI 9	2,60 %	4921,67	1768,86	3152,82
	VUOSI 10	2,60 %	5049,64	1814,85	3234,79
	YHTEENSÄ:		49016,90	17616,77	31400,13

VAIHTOKUSTANNUS	
Loistelamppu	Osram lumilux
kappale hinta (€)	4
määrä (kpl)	120
Yhteensä (€)	480
loistelampun käyttöikä	15000
käyttö tuntia vuodessa	4320
vaihtoväli (vuotta)	3,5
urakointi (€)	500
valaisimenpuhdistus (€)	300
kokonaiskustannus	1280
kunnossapito €/vuosi	368,64

5	KUNNOSSAPITOKULUT/VUOSI	VANHA €	UUSI €	SÄÄSTÖ €
	Huoltokustannus	368,64	100,00	268,64
	YHTEENSÄ:	368,64	100,00	268,64

6	TAKAISINMAKSUAIKA	2,7	VUOTTA

3 ELINKAARIKUSTANNUKSET

Laitteen elinkaari on ajanjakso kohteen käyttöönoton ja käytöstä poiston välillä. Elinkaarikustannuksilla (Life Cycle Costs, LCC) taas tarkoitetaan kaikkia niitä yhteenlaskettuja kustannuksia, joita kohteelle syntyy tai voidaan olettaa syntyvän sille määritetyn elinkaaren aikana. Valonlähteelle elinkaarikustannuksiin vaikuttaa sen investointi- ja asennuskustannusten lisäksi kunnossapito- ja puhdistuskustannukset sekä valaisimien elinkaaren päättyessä kierrätyksestä koituvat kulut. Suurin osa elinkaarikustannuksista syntyy käyttöönoton jälkeisenä aikana. Käytännössä se tarkoittaa, että suunnittelun yhteydessä tehdyllä elinkaarikustannusten pohdinnalla, voidaan käytönaikaisia kustannuksia vähentää merkittävästi. Valaistusratkaisun elinkaarikustannuksia pystytään tarkastelemaan erilaisista näkökulmista. Esimerkiksi suurissa valaistusratkaisuissa, jotka on toteutettu pitkän elinkaaren korkeapaineisilla kaasupurkausvalaisimilla, elinkaarikustannukset ovat yksi erittäin tärkeä tarkastelun kohde hankintavaiheessa. Valaisimien lamppuja vaihdetaan usein nopean valovirran aleneman vuoksi ja valaisimen ikääntyessä vikaherkkyys sekä kulutusosien vaihtotarve tihenee. Valaisimen käyttöikä nojaa usein liitäntälaitteen käyttöikään, jonka päätyttyä valaisin vaihdetaan uuteen tilanteesta riippuen.

LED-valaistusratkaisun elinkaarikustannuksia käsitellään usein määrittämällä investoinnille takaisinmaksuaika. Arviointi on siinä mielessä yksinkertaisempaa, että valaisimiin vaihdettavia LED-moduuleja tai -siruja on vielä vähän saatavilla. Valaisimen käyttöikä sidotaan valonlähteen käyttöikään, jolloin koko valaisin on yleensä uusittava.

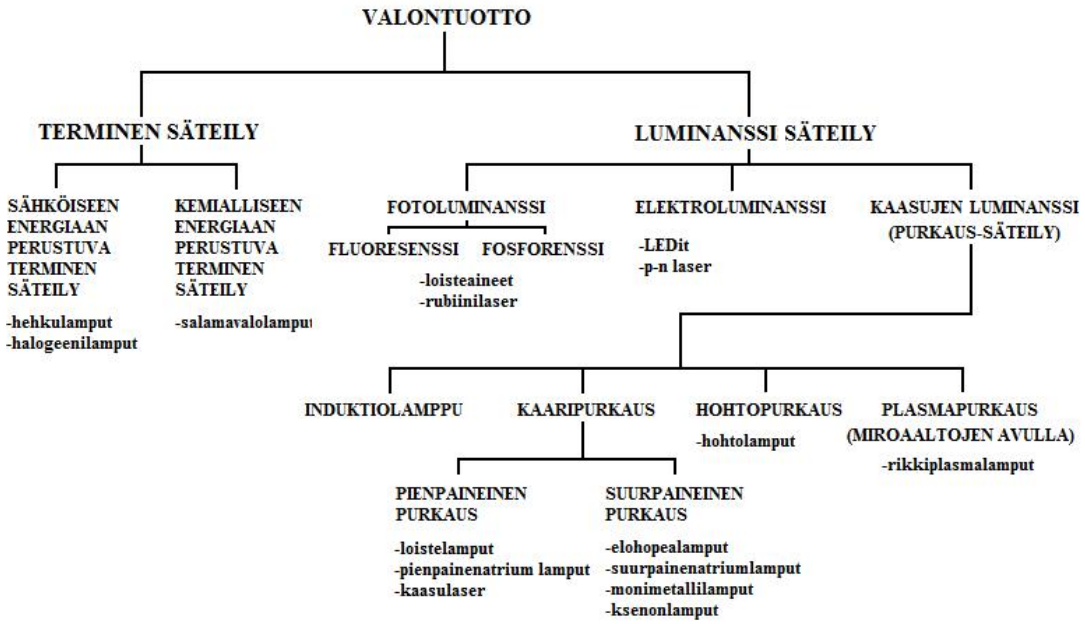
Tavanomaiset kustannuselementit, joista elinkaarikustannuksia laitteelle kertyy ovat:

- investointikustannukset, hankintahinta
- asennus- ja tilauskustannukset
- energiakustannukset
- kunnossapito- ja korjauskustannukset (toistuvat ja ennakoivat korjaukset)
- ympäristökustannukset
- poiston/hävityksen/kierrätyksen kustannukset

(www.ramentor.com/etusivu/teoria/elinkaarikustannukset/)

4 VALONLÄHTEET

Tässä luvussa esitellään takaisinmaksutyökalun kannalta merkittävät valontuottotavat. Valonlähteitä ovat suurpaineisista purkauslampuista elohopeahöyry-, monimetalli- ja suurpainenatriumlamput, pitkät loistelamput sekä LED. Yhteistä kaikille valaisin- ja lampputyypeille on jatkuva vaatimus kehittyä. Valontuottokykyä ja käyttöikää halutaan kasvattaa, kun taas valaisimen kokoa ja energiankulutusta pienentää. Lisäksi valaisimen tulee kestää mekaanista rasitusta, sen elinkaarikustannukset on minimoitava ja hankintahinnan pysyttävä kilpailukykyisenä. Nämä raamit karsivat markkinoilta tehokkaasti teknologiaa, joissa kehitys potentiaali alkaa loppua.



KUVIO 1. Valontuoton päälajit. (Halonen, Lehtovaara 1992)

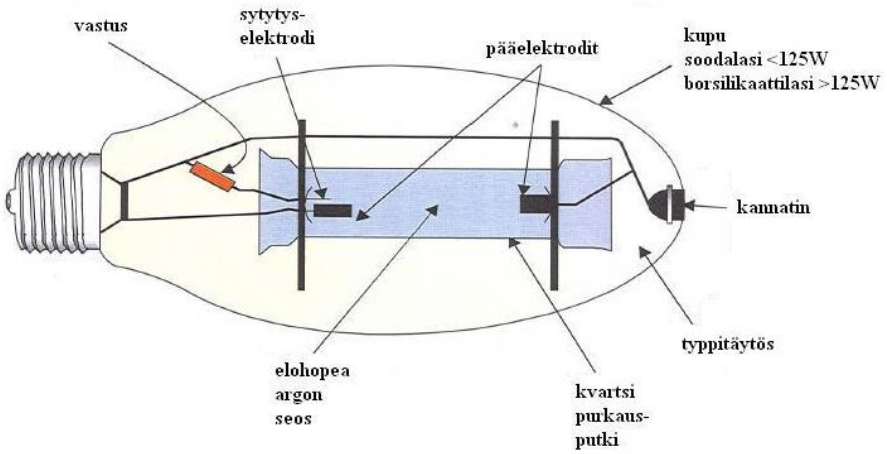
Kuviossa 1 on esitetty, kuinka valontuottotavat jaotellaan niiden toimintaperiaatteen mukaan. Luvussa esiteltävät valonlähteet luokitellaan perustuvan luminanssi säteilyyn. HID- ja loistelamppujen valontuotto perustuu kaasujen kaaripurkaukseen, kun taas LED synnyttää sähkömagneettista säteilyä elektroluminenssin avulla. Valonlähteiden teoreettista maksimia voidaan arvioida laskennallisesti luokkaan 190 lm/W näkyvän valon alueella. Kuitenkin laboratorio olosuhteissa on pystytty saavuttamaan, jopa 276 lm/W valoteho valkoisella R&D teho LED-sirulla. Amerikkalainen valaisin- ja lamppuvalmistaja Cree Inc of Durham rikkoi edeltävän ennätyksen 254 lm/W helmikuussa 2013.
(Simpson 2003; Halonen, Lehtovaara 1992)

4.1. Elohopeahöyrylamppu

Elohopeapurkaukseen perustuvia lamppuja alettiin kehittää jo 1900-luvun alkupuolella. Ensimmäiset korkeapaineiset elohopealamput koostuivat tyhjöpumpatusta lasiputkesta, jonka kummassakin päissä olevat syvennykset olivat täynnä nestemäistä elohopeaa. Sähkövirralla tuotetun lämmön vaikutuksesta elohopea höyrystyi ja toimi elektrodina reaktiossa. Syttyminen saatiin aikaan johtamalla putkeen tasavirtaa sarjavastuksen kautta. Lamppua heilauttamalla elohopea syttyi ja laskemalla takaisin vaakatasoon reaktio jatkui tuottaen valoa. Yhä nykyään elohopealamppuja pidetään tekniikaltaan yksinkertaisimpina HID-lamppuina, joiden toimintavarmuus ja hankintahinta ovat hyvässä suhteessa. (Simpson 2003; Halonen, Lehtovaara 1992)

4.1.1 Toimintaperiaate

Elohopealampun toiminta perustuu elohopeaan, joka höyrystetään purkausputken sisällä kovassa paineessa ja lämmössä. Reaktiossa syntyy sähkömagneettista säteilyä, josta suurin osa on UV-alueella. Purkausputkea ympäröi suojakupu, jonka sisäpinnassa on esimerkiksi yttriumvanadaatti loisteainekerros. Syntyvä UV-säteily aktivoi loisteaineen, joka säteilee ympärilleen näkyvää valoa. Ulkokupu suodattaa suurenosan haitallisesta UV-säteilystä. Täytöskaasuna käytetään elohopeaa ja pientä määrää toista jalokaasua esimerkiksi argonia helpottamaan syttymistä ja johtamaan lämpöä purkausreaktiossa. Tästä apukaasusta käytetään nimitystä inertiakaasu. Apukaasun koostumus ja paine määrittää lampun syttymisjännitteen sekä auttaa lamppua säilyttämään valovirran käyttöiän aikana. Kuviossa 2 on esitetty elliptisen elohopealampun rakenne.



KUVIO 2. Elohopealampun rakenne. (Simpson 2003)

Purkausputken ja ulkokuvun välissä on pienipaineinen typpi kaasu tai typpi-argon-seos. Se toimii lämmön eristeenä ympäristön olosuhteille ja stabiloi purkausputken lämpötilan. Ulkokupu valmistetaan usein borosilikaatti- tai soodalasista. (Simpson 2003; Halonen, Lehtovaara 1992)

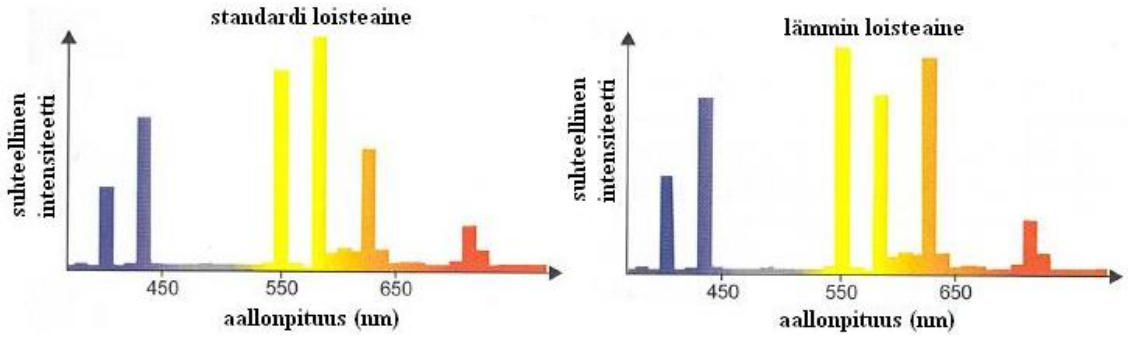
4.1.2 Valontuotto

Elohopealampusta saatava valoteho 30–60 lm/W on HID-lampulle alhainen. Lämpöhäviön osuus ottotehosta on noin 70 %, lampun hyötysuhteen ollessa noin 15 %. Elohopealamppujen käyttöikä määräytyy valovirran aleneman perusteella. Valovirran alenemaa kuvataan kertoimella LLMF (Lamp Lumen Maintenance Factor), joka ilmoittaa prosenteissa, kuinka paljon valonlähteen alkuperäisestä valovirrasta on jäljellä, kun se tulisi vaihtaa. Elohopealamppujen valovirran alenema on LLMF 0,7. Käyttöaika tämän alenemakertoimen saavuttamiseen vaihtelee 15 000-24 000 tunnin välillä riippuen esimerkiksi lamppuun kohdistuneesta mekaanisesta rasituksesta ja kytkentöjen määrästä sekä tiheydestä. Lampun käyttöasento (pysty/vaaka) on yksi valovirran alenemaan vaikuttava tekijä. Pystyasennossa voidaan esittää valovirran säilyvän pidempään kuin vaakasuorassa käytettäessä, mutta valmistajan ilmoittavat lampulle edullisimman käyttöasennon tuoteselosteessa. Alenemaan vaikuttavat polttoasennon lisäksi purkausputken tummuminen, koska katodimateriaalia höyrystyy hitaasti lampun palaessa ja kiinnittyy putken seinämiin estäen syntyvän säteilyn siirtymästä lampusta ympäröivään tilaan. Lisäksi ulkokuvun loisteaine menettää säteilyominaisuuksiaan lampun elinkaarenaikana. (Simpson 2003; Halonen, Lehtovaara 1992)

Purkausputken läpimittaa kasvattamalla voidaan lisätä valokaaren pituutta, joka lisää valotehoa. Valotehokkuus kasvaa kuormituksen kasvaessa valokaaren pituusyksikköä kohden (W/cm). Purkausputket ovat tyypillisesti pituudeltaan 30–100 mm ja läpimitta 10–20 mm. Suuremmissa purkausputkissa lämpöhäviön osuus kasvaa, mutta suurempi elektrodiväli hidastaa valovirran alenemaa. (Simpson 2003; Halonen, Lehtovaara 1992)

4.1.3 Väriominaisuudet

Elohopealampun tuottama valo on sinertävää, koska valo koostuu aallonpituuksista 405, 546, 577 ja 579 nm ja noin viidennes säteilytehosta on UV-alueella. Koska elohopea säteilee heikosti tai ei ollenkaan punaisen aallonpituuksia, värintoisto-ominaisuudet jäävät heikoiksi, joka voidaan huomata kuvion 3 spektrikuvaajista. R_a-luku on yleensä noin 40 ja spektrikorjatuilla loisteaineseoksilla R_a-luku on noin 60. Värilämpötilat vaihtelevat välillä 3800–5000 K. (Simpson 2003; Halonen, Lehtovaara 1992)



KUVIO 3. Loisteaineen vaikutus elohopealampun spektriin. (Simpson 2003)

4.1.4 Liitäntälaitteet

Elohopealamppu on ohjattavissa konventionaalisen kuristimen tai säädettävän virtalähteen avulla. Elektronisia liitäntälaitteita on olemassa, mutta elohopealampuille valitaan liitäntälaitteeksi useimmiten elektromagneettinen kuristin. Tähän on syynä elohopealampun heikko säädettävyys ja elektronisilla liitäntälailla saatava olematon hyöty. Elohopealampun himmennys alue on noin 5-100 %, mutta himmennys on tehtävä hitaasti, jotta lamppu ei sammu. Valmistajat eivät suosittele himmennystä, koska jännitteen modulointi kuormittaa kuluvia osia. Kuviossa 4 on esitetty valaistussuunnittelussa käytettäviä ohjearvoja magneettikuristimen tehohäviöille.

Elohopealamput (kuristin)				W
P_{kok} [W]	$P_{häviö}$ [W]	I_N [A]	I_S [A]	
50	61	11	0,29	0,38
80	92	12	0,44	0,74
125	139	14	0,68	1,18
250	272	22	1,32	2,34

Symbolien selitys

P_{kok} = lampun ja liitäntälaitteen yhteenlaskettu teho [W]

$P_{häviö}$ = liitäntälaitteen tehohäviö [W]

I_N = lampun palamisvirta [A]

I_S = lampun hetkellinen virta syttymisvaiheessa [A]

KUVIO 4. Liitäntälaitteiden ominaisuudet. (Indoor lighting solutions, Fagerhult Oy 2012-2013)

4.1.5 Käyttö

Elohopealamppuja käytetään usein ulkovalaistuksessa esimerkiksi tunnelien valaisemiseen. Ympäröivät olosuhteet kuten lämpötilavaihtelu ei muuta merkittävästi lampun valo-ominaisuuksia. Sisävalaistuksessa käyttökohteita ovat mm. teollisuushallit ja varastohallit, joissa sijoituskorkeus on 3–10m, urheiluhalleissa sekä myymälätiloissa käytetään spektrikorjattuja lamppuja, paremman värintoiston saavuttamiseksi. Elohopealamppujen valikoima on laajin välillä 30–2 000 W. Käytetyimpiä ovat 80–400 W elliptiset lamput. Taulukossa 2 on esitetty elohopealampun vahvuuksia ja heikkouksia. (Simpson 2003; Halonen, Lehtovaara 1992)

TAULUKKO 2. Elohopealampun ominaisuudet

VAHVUUDET	HEIKKOUDET
• edullinen hankintahinta • lämpötilan olematon vaikutus valo-ominaisuuksiin • ei vaadi erillistä sytytintä	• Syttymisaika 3-5 min • suuri elohopean määrä • lampun korkea pintalämpötila • hidas säädettävyys • heikko valovirran pysyvyys • heikot värintoisto-ominaisuudet • pitkä jälleensyttymisaika • lamppujen kuolleisuus • heikko tärinän kesto • hidas jälleensytytys

4.2. Monimetallilamppu

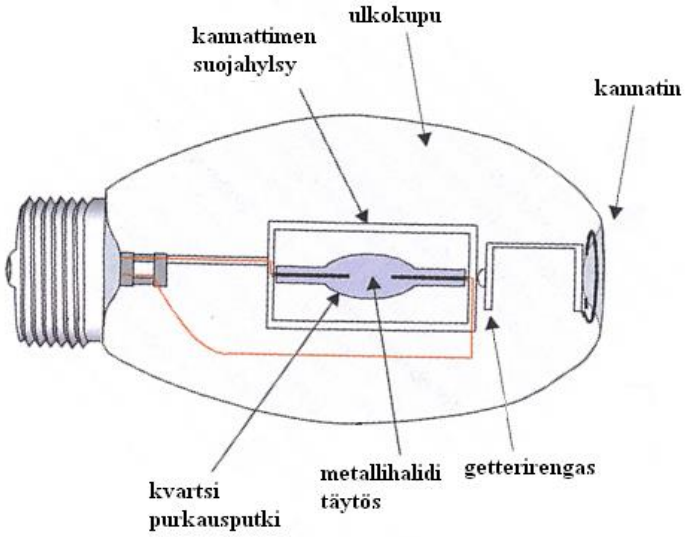
Ensimmäiset monimetallilamput näkivät päivänvalon 1960-luvulla, kun elohopealampun rinnalle alettiin kehitellä värintoisto-ominaisuuksiltaan edistyneempää valonlähdettä. Tuotekehityksessä keskityttiin tutkimaan täytehöyryn ominaisuuksia ja todettiin, että lisäämällä mm. talliumin, natriumin ja indiumin jodiyhdisteitä elohopean sekaan voitiin vaikuttaa purkausputkessa syntyvän säteilyn valontuotto-ominaisuuksiin.

4.2.1 Toimintaperiaate

Toiminnaltaan monimetallilamppu muistuttaa elohopeahöyrylamppua. Kaasupurkaus tapahtuu elohopeahöyryssä, johon on lisätty eri metallien halogeeniyhdisteitä. Lähtötilanteessa halogeeniyhdisteet ovat kiinteässä muodossa ja elohopea tiivistyneenä purkausputken seinämällä. Sytytin synnyttää elektrodien välille niin suuren sähkökentän, että lopulta läpilyönti sytyttää purkausputken inertiakaasun. Tyypillisesti inertiakaasuna käytetään argonia tai neonia. Aluksi syntyvä säteily on peräisin sytytyskaasussa tapahtuvasta purkauksesta. Lämpötilan noustessa, metallihalogeenit ja elohopea alkavat höyrystyä, joka on nähtävissä valonvärilämpötilan muutoksena ja valotehokkuuden nousuna. Puskurikaasuna toimivan elohopean höyrystyminen nostaa purkauksen lämpötilaa, joka kiihdyttää halogeeniyhdisteiden höyrystymistä. Lämpeneminen kestää normaalisti 4-6 minuuttia ennen kuin valaisin saavuttaa lopullisen värilämpötilansa. Lampun palaessa, kaikki elohopea on höyrystyneenä purkausputkeen, mutta täyteaineet eivät höyrysty täysin, vaan pysyvät osittain tiivistyneenä putken kylmäpisteessä sen seinämillä. Kun metallihalogeenit alkavat höyrystyä, ne kulkeutuvat purkauksen kuumaan ytimeen ja hajoavat halogeeni- ja metalliatomeiksi.

Elektrodista irronneet elektronit virittävät atomeja, kunnes ne purkautuvat synnyttäen kullekin metallille yksilöllistä sähkömagneettista säteilyä. Tämä näkyy lämpenemisen aikana valonvärilämpötilan muutoksena ja valotehokkuuden nousuna. Eri metallien synnyttämän säteilyn aallonpituudet voidaan tunnistaa valon spektristä, missä ne näkyvät korkeina pylväinä. Halogeenien spektrikomponentteja ei kuitenkaan voida havaita sillä niiden viritystilan energiat ovat suuria ja säteily siten ulkona näkyvänvalon spektristä. Purkauksen jälkeen halogeeni- ja metalliatomit kulkeutuvat sähkökentän vaikutuksesta pois purkauskanavasta, alhaisemman lämpötilan alueelle. Metalliatomit yhdistyvät

taas halogeenien kanssa purkausputken seinämän tuntumassa ja ovat näin valmiita aloittamaan kierron alusta. Kuviossa 5 on esitetty elliptisen monimetallilampun rakenne. (Simpson 2003; Halonen, Lehtovaara 1992)



KUVIO 5. Monimetallilampun rakenne. (Simpson 2003)

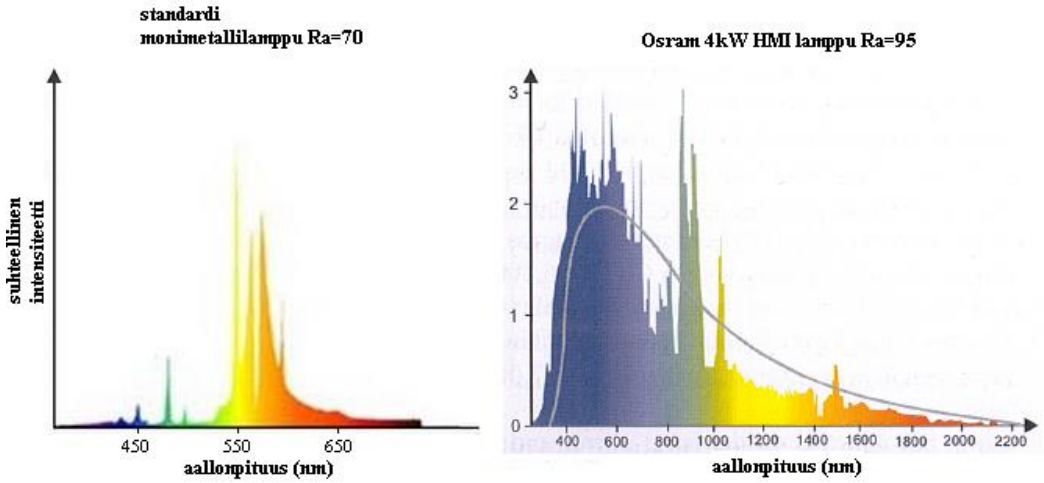
4.2.2 Valontuotto

Elohopealamppuun verrattuna monimetallilampun valotehokkuus on korkeampi noin 75–125 lm/W. Siihen vaikuttavat metalliyhdisteiden lisäksi lampun rakenne ja teho. alenemaa aiheuttaa HID-lampuille tyypilliset tekijät, elektrodimateriaalin höyrystyminen, purkausputken tummuminen sekä metalliyhdisteiden kemiallisen tasapainon muutos sekä lamppuun kohdistunut tärinä ja iskut. Käyttöikä on elohopealamppua lyhyempi, koska valovirran alenema LLMF 0,7 saavutetaan 6000–20 000 tunnin käytöllä. (Simpson 2003)

4.2.3 Väriominaisuudet

Monimetallilamppujen värilämpötilat vaihtelevat normaalisti 3600–4200 kelvinin välillä, koska spektri koostuu 550–600 nm aallonpituuksista. Se vastaa puhtaamman valkoista valoa, jonka värintoistokyky on välillä Ra-65–75. Värinlämpötilaan ja spektrin komponentteihin voidaan, kuitenkin vaikuttaa eri täyteaine seoksilla ja suhteilla, jotta spektristä saadaan halutunlainen. Värintoisto-ominaisuuksien parantamisessa käytetään maametallijodeija esimerkiksi disprosiumia. Sen säteilyn spektri on lähes jatkuva näkyvän valon alueella, jolloin spektristä puutuvat aallonpituudet alkavat säteillä ja värin-

toisto parantuu. Disprosiumlampuille ominainen värilämpötila on 4000–6000 kelviniä ja Ra jopa 85–95. Kuviossa 6 on esitetty valon spektri standardille sekä värikorjatulle monimetallilamppulle. (Simpson 2003; Halonen, Lehtovaara 1992)



KUVIO 6. Spektrin koostumus erilaisilla loisteaineilla. (Simpson 2003)

4.2.4 Liitäntälaitteet

Kytkentä verkkoon on vastaava, kuin elohopealampulla, mutta monimetallilamppu tarvitsee toimiakseen erillisen sytyttimen. Lamppua on mahdollista himmentää elektronisilla liitäntälaitteilla sekä säädettävillä virtalähteillä. Syöttöjännitteen, lisäkuristuksen tai vaihekulman säädön avulla valotehoa voidaan säätää 50–100 % välillä. Ne eivät sovellu kuitenkaan nopeaan säätöön, vaan vaarana esimerkiksi jännitteen moduloinnissa on lampun sammuminen. Kun valaisin sammutetaan, viive uudelleen syttymisessä on hyvin pitkä, jonka aikana säätöä ei voida suositella. Säätö muuttaa täytösaineiden painetta purkausputkessa, joka vaikuttaa myös väriominaisuuksiin, koska seos-suhteet muuttuvat. Valmistajat eivät suosittele säätöä, koska jännitteen muutokset kuormittavat kuluvia osia, joka taas vaikuttaa valovirran alenemaan heikentävästi.

Elektronisista liitäntälaitteista on saatavana nopean jälleen sytytyksen mahdollistavia malleja, jotka sytyttävät vielä kuuman purkausputken 30–50 kV:n sytytyspiikeillä. Elektroninen liitäntälaite on kuitenkin monimetallilampulle olennainen sisätiloissa, jossa halutaan säilyttää valonväriominaisuudet pidempään.

Kuviossa 7 on esitetty monimetallilamppujen liitäntälaitteiden tehohäviöitä, jotka tulee huomioida valaistussuunnittelussa.

Monimetallilamput (EL)

W	P_{kok} [W]	$P_{hävio}$ [W]	I_N [A]
20	25	3	0,21
35	45	6	0,20
70	80	8	0,36
150	162	15	0,70

Symbolien selitys

P_{kok} = lampun ja liitäntälaitteen yhteenlaskettu teho [W]

$P_{hävio}$ = liitäntälaitteen tehohäviö [W]

I_N = lampun palamisvirta [A]

I_S = lampun hetkellinen virta syttymisvaiheessa [A]

Monimetallilamput (kuristin)

W	P_{kok} [W]	$P_{hävio}$ [W]	I_N [A]	I_S [A]
35	44	9	0,22	0,28
70	85	15	0,41	0,47
100	114	14	0,55	0,75
150	168	18	0,82	1,11

KUVIO 7. Liitäntälaitteiden ominaisuudet. (Indoor lighting solutions, Fagerhult Oy 2012-2013)

4.2.5 Käyttö

Monimetallivalaisimet soveltuvat niin sisä- kuin ulkokäyttöön. Niitä käytetään urheilukenttien valaistuksessa sekä suurien hallien ja varastojen katoissa. Myös aluevalaistus esimerkiksi rakennustyömailla voidaan toteuttaa monimetallilampuilla. Lamppua ympäröivän tilan olosuhteet eivät vaikuta oleellisesti niiden valontuottoon. Elektronisen sytyttimen toiminta voi estyä kuumassa, kun sen puolijohdemateriaalien lämpötila nousee yli 80 asteen. Lampputyypit jaotellaan purkauputki materiaalien perusteella kahteen ryhmään: kvartsilasisiin FS (Fused Silica) ja keraamisiin CDM (Ceramic Discharge Metal halide). Käytetyimpiä lampputyyppejä ovat yksi- ja kaksikantaiset sekä kierrekantaiset monimetallilamput. Niiden tehoskaala on laajin välillä 35 W-20 kW.

Taulukkoon 3 on koottu monimetallilampun hyviä ja huonoja puolia.

TAULUKKO 3. Monimetallilampun ominaisuudet

VAHVUUDET	HEIKKOUDET
• valaisimet edullisia • lämpötilan olematon vaikutus valo-ominaisuuksiin • saatavana elohopea vapaina • hyvä valotehokkuus ja paremmat värintoisto-ominaisuudet kuin elohopealampulla	• lampput arvokkaita • Syttymisaika 3-5 min • lyhyt käyttöikä • korkea pintalämpötila • hidas säädettävyys • nopea valovirran alenema • pitkä jälleen syttymisaika • lamppujen kuolleisuus • huono tärinän kesto • paljon korkeampi syttymisjännite, kuin elohopealampulla

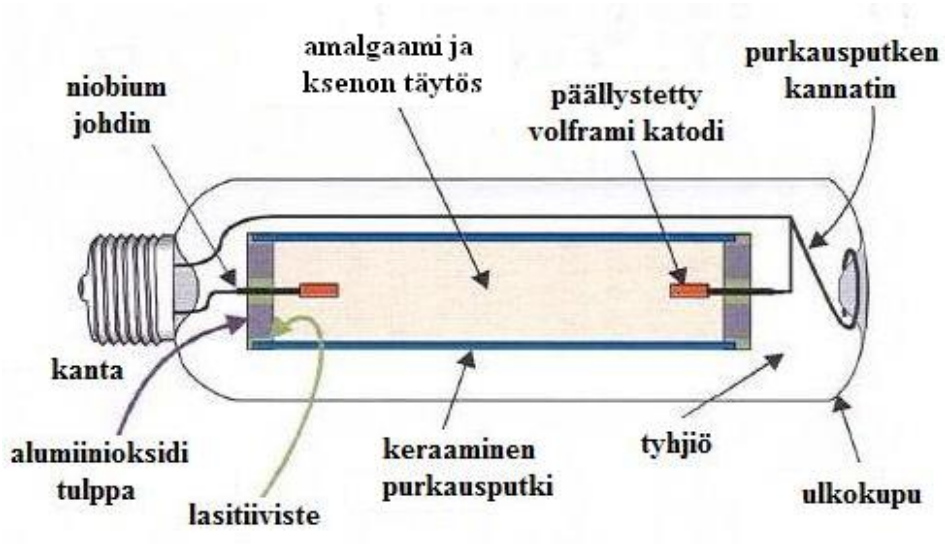
4.3. Suurpainenatriumlamput

Suurpainenatriumlamput HPS (High Pressure Sodium) on alun perin kehitetty parantamaan elohopealamppujen heikkouksia. Niiden myötä mm. lampun koko, valotehokkuus, käyttöikä, energiatehokkuus ja värintoisto-ominaisuudet ovat harpanneet suuren askeleen. Vaikkakin suurin osa suurpainenatriumlampuista sisältää vielä elohopeaa, on markkinoille saatu myös elohopeavapaita lamppuja.

4.3.1 Toimintaperiaate

HPS-lampun toimiessa natriumhöyrynpaine tulee olla noin 10 kPa:lia, jotta saavutetaan maksimaalinen valontuotto. Stabiilissa tilassa, natriumin ja elohopean muodostama amalgaamiseos on vain osin höyrystyneenä purkausputkeen. Loput amalgaamista on tiivistyneenä purkausputken kylmäpisteen läheisyydessä, joka sijaitsee putken päässä elektrodien takana. Höyrystyneen amalgaamin määrä ja paine riippuu kylmäpisteen lämpötilasta. Täytökseen lisätään jalokaasua, normaalisti ksenonia (Xe), joka toimii sytytyskaasuna. Volframi elektrodeihin johdetaan vaihtojännitettä (sytytysjännite), jolloin ne toimivat vuoroin anodina ja vuoroin katodina virittäen ksenon atomeja. Kun ksenonkaasu saavuttaa läpilyöntijännitteen, se syttyy käynnistäen reaktiokierron. Kun

syttymiskaasu virittyy ja ionisoituu lamppu säteilee himmeää valkoista ksenonin tuottamaa valoa. Lampun lämmetessä, yhä enemmän amalgaamia höyrystyy, jolloin valotuotto kasvaa hitaasti ja värilämpötila muuttuu lämpimämmäksi natriuminpitoisuuden noustessa täytöshöyryssä. Tyypillisesti lämpeneminen kestää 5-10 minuuttia, jolloin lamppu on saavuttanut 80 % lopullisesta valovirrastaan. Tällöin amalgaamin lämpötila on noin 615–750 asetetta, jossa natriumhöyrynpaine on noin 7 kPa, elohopeahöyryn 60 kPa ja ksenonin noin 20 kPa. Kuviossa 8 on esitetty yksikantaisen HPS-lampun rakenne.



KUVIO 8. Suurpainenatriumlampun rakenne. (Simpson 2003)

Täytöksen natrium ja elohopea höyrynpaine on huoneenlämmössä hyvin alhainen, mikä pitää niiden läpilyöntijännitteen korkeana. Koska sähköisen järjestelmän sytytysjännitteen on oltava suurempi, kuin täytöksen läpilyöntijännitteen, voidaan ksenonin avulla laskea läpilyöntijännitettä. Elektroniselta sytyttimeltä vaaditaan näin alhaisempi sytytysjännite. Sytytyskaasun paine huoneen lämmössä on noin 3 kPa. Muissa purkauslampuissa sytytyskaasuina käytettävät argon ja neon soveltuisivat muilta osin myös HPS-lamppuihin, mutta niiden valontuotto-ominaisuudet ovat ksenonia heikommat.

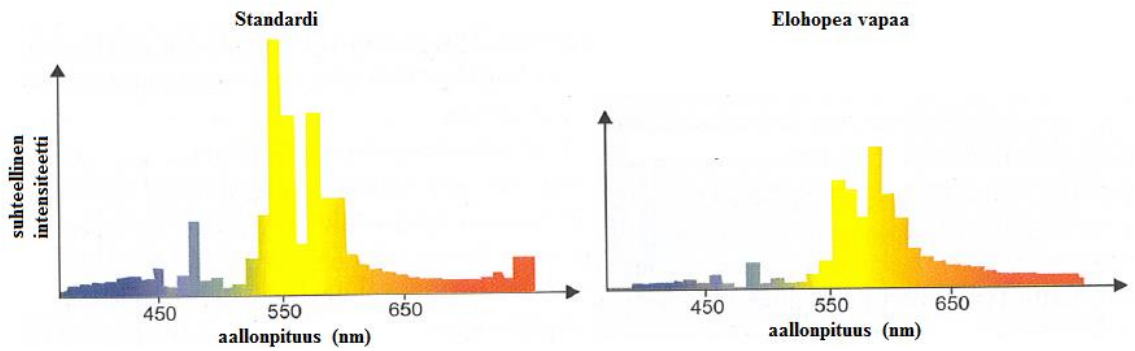
4.3.2 Valontuotto

Valon tuottoon vaikuttaa amalgaamin paine ja väriominaisuuksiin amalgaamin seossuhteet sekä sen lämpötila. Toisin kuin elohopea- tai monimetallilamput, natriumlamppu ei himmene merkittävästi ikääntyessään, sillä purkausputken paine pysyy pitkään stabiilina. Muilta osin valo-ominaisuudet määräytyvät purkausputken mittojen ja –materiaalin

sekä ulkokuvun materiaalin. Purkausputken läpimitta on tyypillisesti 5-10 mm, pituus 50–100 mm ja seinämän paksuus 0,5-0,8 mm. Lamppujännite määräytyy purkausputken kentänvoimakkuuden ja mittojen perusteella. Valotehoa saadaan noin 70-150 lm/W, selvästi pienemmällä energian kulutuksella, kuin esimerkiksi monimetallilampuissa. Hyötysuhde on lähempänä 30–40 % luokkaa. Tästä syystä suurpainenatriumvalaisimet ovat hyvin käytettyjä ja valovirran alenema LLMF 0,7 voidaan sanoa olevan noin 20 000-36 000 tunnin iässä. Valovirran alenemaan vaikuttaa, HID-lampuille tyypilliset tekijät, kuten elektrodien kuluminen, joka kiihtyy sytytystiheyden kasvaessa. Niiden lisäksi uudelleen sytytys yritykset ennen, kuin lamppu on jäähtynyt riittävästi kuluttavat elektrodeja voimakkaasti. Myös amalgaamissa tapahtuva natriumhävikki vaikuttavat lampun ikääntyessä valovirran alenemaan.

4.3.3 Väriominaisuudet

Noin 85 % pienpainenatriumlampun säteilystä koostuu natriumin resonanssiviivoista, joiden aallonpituudet ovat lähellä silmän spektriherkkyyskäyrän V(λ) maksimia 555 nm. Ne ovat niin sanottuja D-viivoja, jotka säteilevät 589 nm ja 589,6 nm aallonpituuksilla tuottaen voimakkaan oranssia valoa välillä 1900-2700K. Paineen vaikutus valontuottoon on merkittävä. Kun paine nousee HPS-lampuissa, D-viivojen itseabsorbtio kasvaa ja valontuotto laskee. Itseabsorbtiossa on kyse ilmiöstä, jossa samassa lämpötilassa olevat atomit absorboivat toistensa säteilyä. Lukuun ottamatta muutamaa säteilypiikkiä, HPS-lampun spektri on lähes jatkuva, tuloksena voimakkaasti kellertävää valoa 2000–2400 K. Natriumin seassa oleva elohopea säteilee myös punaisen alueella, kuten kuvion 9 spektristä voidaan huomata. Puskurikaasuna elohopea ei vaikuta oleellisesti spektrin koostumukseen, vaan parantaa lähinnä valotehokkuutta.



KUVIO 9. Elohopean vaikutus suurpainenatiumlampun spektriin. (Simpson 2003)

UV-säteilyn osuus valossa on vähäinen, mutta IR-säteilyä syntyy noin 25–30% elohopea pitoisuudesta riippuen. Suurpainenatriumvalaisimien Ra-luku on välillä 20-80 riippuen amalgaamiseoksesta. Joka tapauksessa oranssin valonsa vuoksi sen värintoistoominaisuudet jäävät heikommiksi, kuin elohopea- tai monimetallilampuilla. Värintoistoominaisuuksien parantaminen eri puskurikaasuilla laskee lampun valotehokkuutta.

4.3.4 Liitäntälaitteet

Magneettinen kuristin suunnitellaan antamaan HID-lampulle yksilöllinen jännite tai virta, mutta pääasiassa kaikki kuristimet (<1 kW HID-valaisimiin) toimivat 230 voltin yksivaihe syötöllä. Elohopea- sekä monimetallilamput ovat vakio jännitteellä toimivia, eikä niiden toimintaan vaikuta verkkojännite. Suurpainenatriumlampussa on purkausjännite, joka riippuu purkauksen tehosta. Tästä syystä lampun on toimittava 5 % sisällä asetetusta lamppujännitteestä. Liitäntälaitteeksi valitaan usein magneettinen kuristin niiden edullisuuden ja yksinkertaisuuden vuoksi. Kuviossa 10 on esitetty valaistussuunnittelussa käytettäviä ohjearvoja eritehoisten kuristimien tehohäviöille.

.

HPS-lamppujen elektronisilla liitäntälaitteilla ei saavuteta merkittäviä hyötyjä valotehon, tehohäviön tai välkynnän parantamisessa. Elektronisista liitäntälaitteista saadaan paras hyöty pienillä 30–100 W lampuilla. HID-lamppujen säädön ongelmana ovat akustiset resonanssit. Akustisia resonansseja syntyy, kun lampun tehoa muutetaan säätötarkoituksessa. Se saa aikaan paineaallon purkausputkessa, jonka vaikutuksesta purkaus on epävakaa ja plasman lämpötila ja paine muuttuvat. Tämä näkyy lampun valovirran ja värin vaihteluna sekä valossa voi esiintyä välkkymistä. Samalla lamppujännite nousee, jonka seurauksen lamppu saattaa sammua äkillisesti.

Suurpainenatriumlamput (kuristin) W

P_{kok} [W]	$P_{hävio}$ [W]	I_N [A]	I_S [A]	
50	62	12	0,29	0,34
70	85	15	0,41	0,54
100	116	16	0,55	0,73
150	170	20	0,83	1,16
250	278	28	1,33	1,70

Symbolien selitys

P_{kok} = lampun ja liitäntälaitteen yhteenlaskettu teho [W]

$P_{hävio}$ = liitäntälaitteen tehohäviö [W]

I_N = lampun palamisvirta [A]

I_S = lampun hetkellinen virta syttymisvaiheessa [A]

KUVIO 10. Liitäntälaitteiden ominaisuudet.

4.3.5 Käyttö

Käyttökohteita ovat aluevalaistus, suuret hallit ja varastot sekä kohteet, joissa oranssinsävyistä valoa ei koeta epämiellyttäväksi tai siitä ei ole haittaa esimerkiksi kasvihuoneissa. Yleisesti käytetyimpiä HPS-lamppuja ovat ellipsi- ja putkilamppu, joissa on E27 tai E40 kierrekanta, mutta kaksikantaisia HPS-lamppuja löytyy suuritehoisimmista valaisimista. Elohopea vapaissa HPS-lampuissa käytetään myös ksenonkaasua, mutta sen paine on kymmenkertainen normaaliin lamppuun verrattuna. Purkausputki on merkittävästi pidempi ja ohuempi, kuin standardi tyypeissä. Taulukossa 4 on esitetty yhteenveto HPS-lampun hyvistä ja huonoista puolista.

TAULUKKO 4. Suurpainenatriumlampun ominaisuudet

VAHVUUDET	HEIKKOUDET
• lämpötilan olematon vaikutus valo-ominaisuuksiin • saatavana elohopea vapaina • korkeampi valotehokkuus ja pidempi käyttöikä kuin elohopea- ja monimetallilampulla • hyvä valovirran pysyvyys • pitkä käyttöikä • matala syttymisvirta • HID-lampuista energiatehokkain	• syttymisaika 5-10 min • valon oranssi sävy (2000K) • korkea pintalämpötila • hidas säädettävyys • pitkä jälleen syttymisaika • lamppujen kuolleisuus • huono tärinän kesto • paljon korkeampi syttymisjännite, kuin elohopealampulla

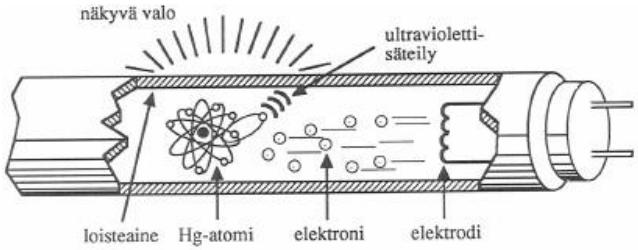
4.4. Loistelamppu

Loistelamppu on alun perin ranskalaisen fyysikon Alexander E. Becquerelin kehittämä vuonna 1857. Kaikkia sai alkunsa hänen tutkiessaan fluoresenssi ja fosforenssi ilmiöitä. Testauksessa elektroninen purkausputki päällystettiin loisteaineella, joka saatiin emittoimaan valoa elohopeahöyryn reagoidessa putken sisällä matalassa paineessa. Loisteputket muistuttivat jo silloin hyvin paljon nykyisiä loistelamppuja.

4.4.1 Toimintaperiaate

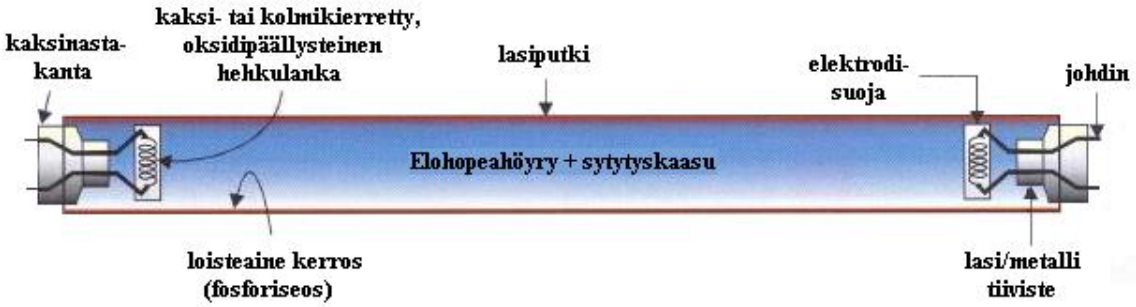
Valontuotto perustuu purkausputkessa synnytettävään kaasupurkaukseen. Putken täytösjalokaasuna käytetään mm. argonia, kryptonia, neonia tai näiden seosta. Täytekaasun

paine on elohopeapurkauslamppuun verrattuna alhaisempi n. 200-600 Pa. Sen tarkoituksena on helpottaa syttymistä ja johtaa tasaisesti sähkömagneettista purkausta pitkän purkausputken mitalla. Purkausreaktion käynnistetään sytyttimellä, jota kontrolloidaan magneettisella tai elektronisella kuristimella. Purkausputken molemmissa päissä olevat elektrodit ovat kytketty vaihtojännitteeseen ja ne vaihtavat tilojaan vuoroin anodiksi ja vuoroin katodiksi. Elektronien lämpötilan noustessa noin 1100 asteeseen ne alkavat emittoida elektroneja siirtäen virtaa anodin ja katodin välillä. Kuviossa 11 on esitetty loistelampun toiminta.



KUVIO 11. Loistelampun toimintaperiaate (Halonen, Lehtovaara 1992)

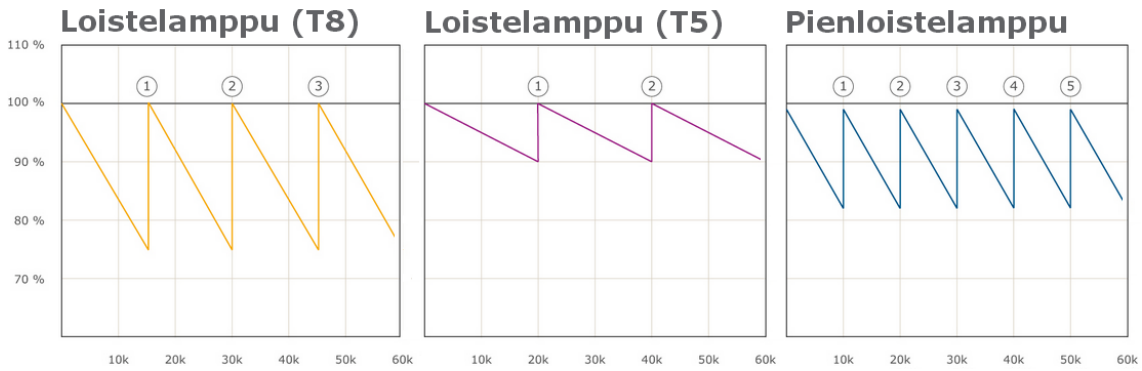
Kun purkaus käynnistyy, laskee elohopeahöyryn paine noin 1-1,3 pascaliin, putken saavuttaessa toimintalämpötilansa. Purkauksen voimasta liikkuvat elektronit törmäävät elohopea atomeihin ja virittävät niitä. Elohopean ionien purkaessa viritystä takaisin perustilalle se säteilee resonanssitaajuudellaan, jonka aallonpituus on 256nm. Tätä säteilyä ihminen ei pysty havaitsemaan, koska aallonpituus on ultravioletti alueella. Purkauksessa syntyy myös muita aallonpituuksia, joista silmä voi kuitenkin havaita vain noin 10 %. Varsinainen näkyvän valon tuotto tapahtuu resonanssitaajuuden avulla, kun UV-alueen resonanssisäteily virittää purkausputken seinämissä olevan fosfori loisteainekerroksen atomeja. Kuviossa 12 on esitetty loistelampun rakenne.



KUVIO 12. Loistelampun rakenne. (Simpson 2003)

4.4.2 Valontuotto

Loistelampulla voidaan muuttaa noin 20 % syötettävästä sähköenergiasta näkyvän valon aallonpituuksiksi. Tämä tarkoittaa suurta lämpöhäviön osuutta, jossa syntyy myös paljon IR-säteilyä. Teoreettinen valotehokkuus loistelapuille on välillä 25-80 lm/W, mutta T5 loistelampulla voidaan saavuttaa yli 100 lm/W arvoja. Valotehokkuus riippuu purkausputken pituudesta, fosforien laadusta ja jännitteen syöttötaajuudesta. Loistelamppujen laajan valikoiman vuoksi käyttöikä on välillä 6 000-20 000tuntia. T5-loistelampun LLMF 0,9 saavutetaan noin 20 000 tunnin käyttöiässä. Kuviossa 13 on esitetty erityyppisten loistelamppujen valovirran alenemaa ja putkien vaihtoväliä.



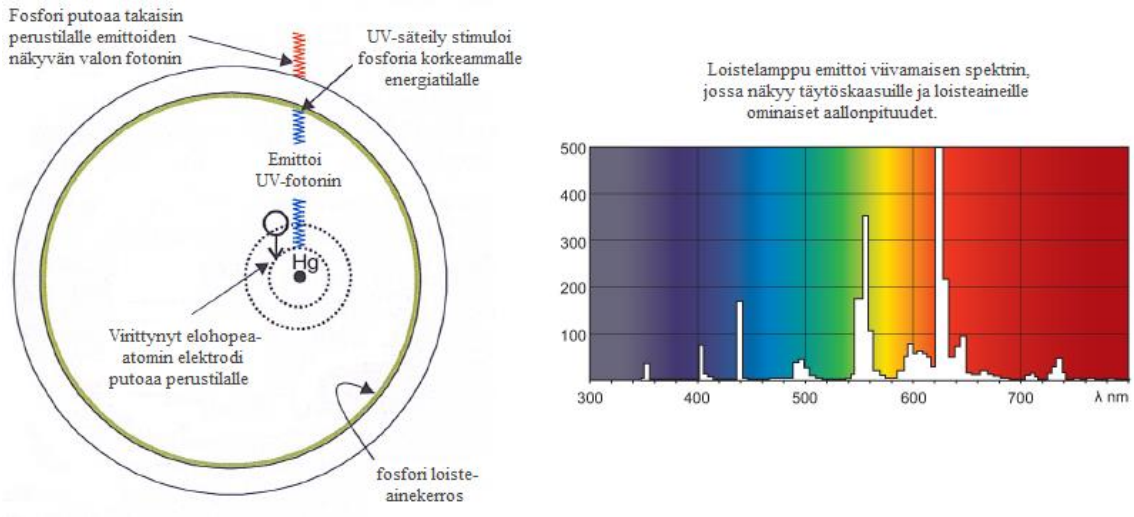
KUVIO 13. Loistelamppujen vaihtoväli 50000tunnin käyttöaikana (www.glamox.fi, valovirranpysyvyys-arvot)

Purkausputken täytöskaasun paine vaikuttaa olennaisesti lampun käyttöikään. Valovirran alenemaa loistelampuille aiheuttaa täytöskaasun alhainen paine. Tilanne on ongelmallinen, sillä täytöskaasun paineen nostaminen estää lampun päiden tummumista ja parantaa valovirran pysyvyyttä, mutta laskee lampun ominaisvalovirtaa ja heikentää purkauksen syttymistä.

4.4.3 Väriominaisuudet

Purkauksessa syntyvän säteilyn aallonpituudet ovat 254, 313, 365, 405, 546, 578nm. Elohopeahöyryn ionisoituessa resonanssisäteily on suurilta osin UV-alueella, mutta se voidaan muuttaa näkyvän valon aallonpituuksiksi käyttämällä eri loisteaineita purkaus-

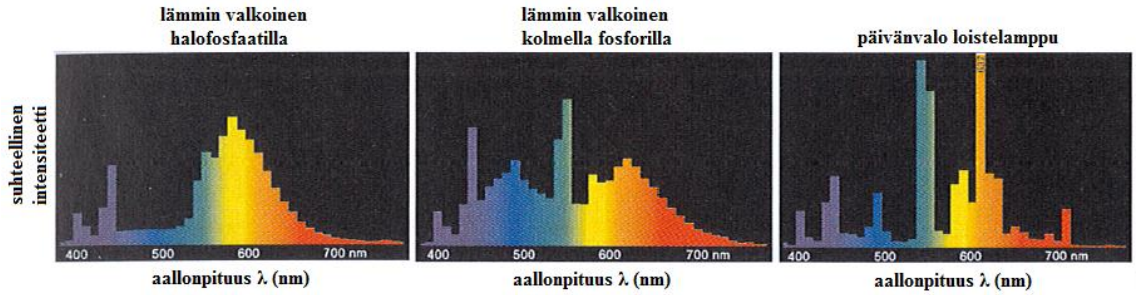
putken pinnoitteena. Kuviossa 14 on esitetty, kuinka loisteaine muuttaa UV-säteilyn näkyvän valon aallonpituuksiksi.



KUVIO 14. Loisteaineen toiminta

Fosforit ovat epäorgaanisia kideseoksia, joihin on lisätty pieniä määriä metallia käynnistämään fluoresenssi loisteaineessa. Tämä ilmiö saa alkunsa, kun UV-säteily stimuloi fosforiseoksen elektroneja korkeammalle energiatasolle, synnyttäen samalla lämpöenergiaa. Kun elektroni putoaa takaisin normaalille tilalle, siitä emittoituu fotoneita, joiden aallonpituudet ovat näkyvän valon alueella. Fluoresenssi on säteilyä, joka emittoituu UV-säteilyn vaikutuksesta ja fosforenssi on säteilyä, jonka emittoituminen jatkuu säteilyn poistuttua vielä hetken.

Spektrin koostumus on niin sanottu ainespektri, jossa jokainen loisteaine säteilee sille ominaisella aallonpituudella. Halvempien loisteaineiden Ra-luku on noin 50, mutta parempiin värintoistoarvoihin päästään käyttämällä kolmen fosforin teknologiaa. Sekoittamalla kolmen päävärin fosforeja, voidaan muodostaa jatkuvaspektri punaisen (610nm), vihreän (545nm) ja sinisen (450nm) spektrikomponentin avulla ja saavuttaa Ra 80–85 värintoisto. Päivänvaloloistelampuilla voidaan kuitenkin saavuttaa, jopa yli 90 Ra-luku, joka toteutetaan arvokkaammilla monikaista fosforeilla. Loisteainekerroksen koostumus määrittää myös valon värilämpötilan. Kuviossa 15 on esitetty erilaisilla loisteainekerroksilla tuotettuja aikaan saatavia spektrejä.

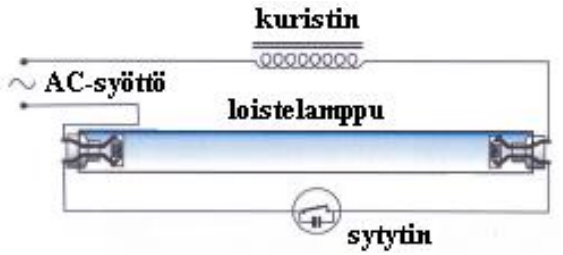


KUVIO 15. Täytöksen ja loisteaineen vaikutus spektriin (Simpson 2003)

Loistelamppujen standardi valkoiset ovat CCT arvoiltaan 3000K lämmin valkoinen, 3500K valkoinen, 4000K kylmä valkoinen ja 6500K päivänvalo. Toimistotiloissa sen sijaan on alettu käyttää luonnonvalkoista, sinertävää ja viileää valoa 5500-6500K. Elektronisilla liitäntä laitteilla voidaan syöttää sytyttimelle ja purkausputkelle omat jännitteet. Tämä on pidentänyt loistevalojen käyttöikää ja valon laatua merkittävästi. Myös valotehoa on saatu lisää.

4.4.4 Liitäntälaitteet

Koska loistelamppu on vakio jännitteinen valonlähde, se tarvitsee virranrajoittimen eli kuristimen. Kuristimia on kahdenlaisia, vanha magneettikuristin ja uudemmissa loistevalaisimissa käytettävä elektroninen kuristin. Sen tehtävän on rajoittaa purkauksen ottamaa virtaa ja ohjata sen toimintaa. T8 ja T5-malleja voidaan himmentää ainoastaan elektronisilla liitäntälaitteilla. Kuviossa 16 on esitetty loistelampun kytkentä sähköverkkoon.



KUVIO 16. Loistelampun kytkentä (Simpson 2003)

Magneettisilla kuristimilla varustettuja vanhempia loistevalaisimia korvataan elektronisin liitäntälaittein. Niiden etuna on noin 15 % parempi energiatehokkuus, putken käyttöiän piteneminen ja 10 % hyötysuhteen nousu. Elektronisilla liitäntälaitteilla voidaan poistaa myös työskentelyä heikentävää haitta välkyntää, jota ihminen ei kykene erotta-

maan, mutta aivot rekisteröivät sen tiedostamatta. Toimintataajuuden noustessa 40 kHz:n lamppu palaa tasaisesti välkkymättä. Lisäksi lämpö- ja tehohäviöiden osuus laskee eikä sytytintä tarvitse lampun vaihdon yhteydessä erikseen uusia, koska se on integroitu liitäntälaitteeseen. Magneettisilla kuristimilla varustetut loistelamput, menettivät käyttöikäänsä Päälle/Pois kytkentöjen myötä. Sytytys virtapiikki kulutti elektrodia, joka myös höyrystyi vähitellen. Lämminkäynnistyksellä varustettu liitäntälaite esilämmittää katodit ennen sytytystä, joten hehkulankaa kuormitetaan vähemmän.

4.4.5 Käyttö

Loistelamput ovat tunnetuimpia yleisvalaisimia niiden monikäyttöisyyden vuoksi. Esimerkiksi toimistot, opetustilat, suuret hallit, myymälät ja pitkät käytävät voidaan valaista toimivasti loistevaloilla. Loistelamppujen valikoima on hyvin laaja. Niiden toimintaperiaate säilyy silti samana, vaikka täytöskaasu, sytytyskaasu ja loisteaineiden ominaisuudet vaihtelevat. Loistelamput voidaan jakaa kahteen ryhmään, yksi ja kaksikantaisiin. Kaksikantaisista loistelampuista käytetyimpinä ovat jo käytöstä poistuva T12 ja T8, sekä niitä korvaamaan suunniteltu hyötysuhteeltaan, energiankulutukseltaan ja valoteholtaan kehittyneempi malli T5. Taulukossa 5 on esitetty loistelamppujen hyviä ja huonoja puolia valonlähteenä.

TAULUKKO 5. Loistelampun ominaisuudet

VAHVUUDET	HEIKKOUDET
• hyvä ohjattavuus • säätyy portaattomasti (mm.T5) • saatavana elohopea vapaina • hyvä valovirran pysyvyys • korkea valotehokkuus • ei akustisia resonansseja • laaja värilämpötila valikoima	• ympärisäteilijä, putken takaa valo joudutaan heijastamaan • vanhat lamput energiasyöppöjä • hyötysuhde • vanhemmat lamput sisältävät elohopeaa • suuri koko • ulkonäkö

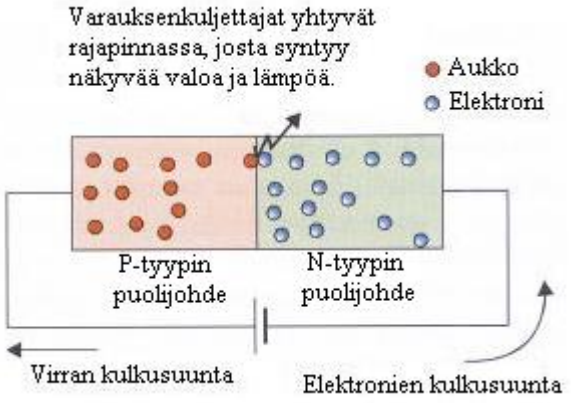
4.5. Valoa emittoiva diodi

LED (Light Emitting Diode) eli valoa emittoiva diodi on puolijohdekomponentti, jolla sähköenergia voidaan muuttaa sähkömagneettiseksi säteilyksi elektroluminanssin avulla. Diodin kyvystä tuottaa näkyvää valoa tehtiin ensimmäiset havainnot jo 1900-luvun alkupuolella, mutta puolijohdekomponenttien tavoitteellinen kehitys aloitettiin vasta 1960-luvulla. Lähtö tilanteessa LEDit toimivat lähinnä merkkivaloina erilaisissa merkinantojärjestelmissä. Myöhemmin teknologian kehittyessä, puolijohdemateriaaleihin esiteltiin vaihtoehtoisia yhdistelmiä. LED-komponenttien heikko valotehokkuus on pitkään ollut ongelma niiden käytölle yleisvalaistuksessa. Viime vuosien aikana uudensukupolven LEDillä on saatu tuotettua vaadittavat valo-ominaisuudet myös yleisvalonlähteenä ja LED- valistusratkaisut ovat alkaneet korvata vanhaa lamppukantaa. Ne ovat kilpailukykyisiä pienen kokonsa, alhaisen energiankulutuksen ja pitkän käyttöiän ansiosta. (Schubert 2006)

4.5.1 Toimintaperiaate

LED-sirun toimintaperiaate poikkeaa täysin muista valonlähteistä. LEDi eli hohtodiodi on elektroniikan puolijohdekomponentti, joka toimii kun siihen johdetaan tasajännitettä. Se päästää sähkövirran kulkemaan lävitseen vain yhteen suuntaan, jota kutsutaan päästösuunnaksi. LED-ydin koostuu kahdesta puolijohdemateriaalista, joiden elektronitasapaino poikkeaa toisistaan. Toinen puolijohteista on positiivisesti varautunut P-tyypin materiaaliseos, jonka atomien radoilla on elektronivajausta eli aukkoja. Toinen puolijohteista on negatiivisesti varautunut N-tyypin materiaaliseos, jonka atomeissa liikkuu vapaasti ylimääräisiä elektroneja. Puolijohteita erottaa niiden välissä oleva rajapinta. Kun P-N-puolijohteeseen ei johdeta sähkövirtaa, elektronit pysyvät lepotilassa ja rajakerros on tyhjä. Riittävän suuren päästösuuntaisen tasajännitteen kytkeytyessä, sähkökenttä työntää virrankuljettajat (elektronit ja positiiviset aukot) liikkeelle. Ne siirtyvät rajapinnan yli, jolloin sähkövirta kulkee diodin läpi. Elektronit yhtyvät vastaan tuleviin atomeihin, joiden radoilla on elektronivajausta. Tätä ilmiötä kutustaan suoraksi emissiorekombinaatioksi, jossa korkeammalla energiatasolla oleva elektroni putoaa johtavuusvyöstä atomin valenssivyön tyhjälle sidostilalle eli aukolle vapauttaen valokvantin.

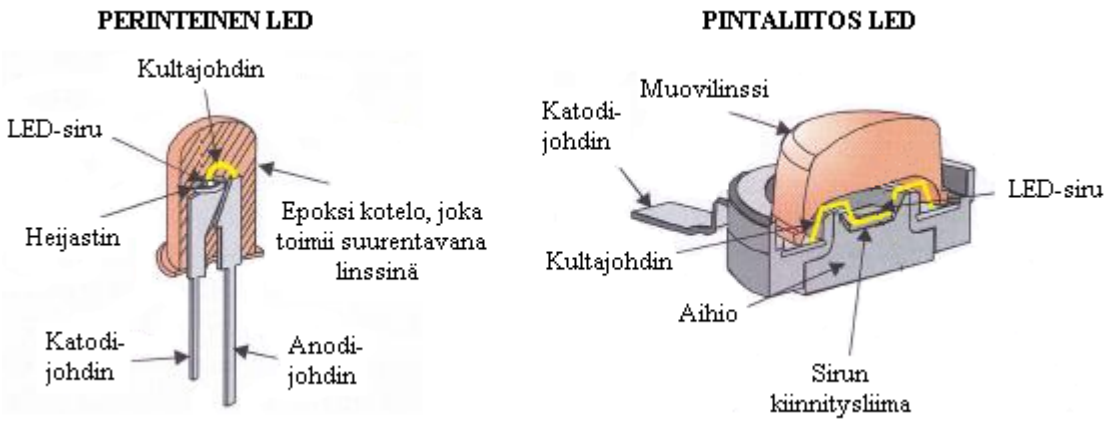
Osa näsitä rekombinaatioista on epäsuoria, jolloin syntyvä energia aiheuttaa värähtelyä ja muuttuu lämmöksi. Kuviossa 17 esitetään, kuinka valofotoneita emittoituu puolijohteiden rajapinnassa. (Schubert 2006)



KUVIO 17. Reaktio puolijohderajapinnassa (Schubert 2006)

LED tuottaa valoa silloin, kun siihen kytketty päästösuuntainen jännite ylittää kynnysjännitteen arvon. Kynnysjännite on riippuvainen valon väristä, joka toteutetaan erilaisilla puolijohde yhdistelmillä. LEDin päästösuuntaisen syöttöjännitteen on oltava suurempi tai yhtä suuri, kuin rajapinnassa säteilevien fotonin luovuttama energia. Esimerkiksi sinisen LEDin fotoni säteilee 450-500nm aallonpituudella, säteilyenergian ollessa noin 2,6 elektronivolttia, joka määrää kynnysjännitteen arvoksi 2,6 volttia. Syöttöjännitteen noustessa LED tuottaa yhä enemmän valoa, mutta myös lämpöä. Virranrajoitinta tarvitaan estämään syöttöjännitteen nousun yli rajan, jossa komponentti rikkoutuu. Näkyvän valona fotoneilla, säteilyenergia on 1,75–3,1 elektronivoltin välissä. (Schubert 2006)

Rakenteeltaan LED-valaisin koostuu kytkentäpinneistä, puolijohdesiruista ja kotelosta, johon komponentit on valettu. Rakenteita on paljon erilaisia riippuen sovelluksesta ja LED-sirulta vaadituista ominaisuuksista. Koska elektroluminanssissa syntyy lämpöä, on uusissa pintaliitos LED-valaisimissa ytimen yhteyteen liitetty jäähdytyselementti, joka estää sirua lämpenemästä valontuotolle ja komponenteille haitalliselle tasolle. Valon säteilyn suuntaan voidaan vaikuttaa valaisinrungon heijastimilla sekä rajata avautumiskulmaa erilaisilla kuvuilla. Lisäksi valon häikäisyä voidaan vähentää lisäämällä valaisimeen optinen kalvo esimerkiksi opaaliakryyli, joka toimii diffuusorina säteilylle. Valon jakaumaan sirun ympärille vaikutetaan linssimateriaaleilla, joka yleensä toteutetaan muovilla tai silikonilla. (Schubert 2006)



KUVIO 18. LEDin rakenne (Simpson 2003)

Yhdestä hohtodiodista saadaan harvoin riittävä määrä valoa, joten ne voidaan yhdistää ryhmiksi samalle alustalle. Multichip on usean LEDin muodostama valonlähde, jota hyödynnetään mm. LED-heittimissä ja syväsäteilijöissä suuremman valotehokkuuden aikaansaamiseksi. LED-moduuli on hohtodiodiryhmä, joka voidaan suunnitella valaisimeen antamaan haluttu valotehokkuus. (Schubert 2006)

4.5.2 Valontuotto

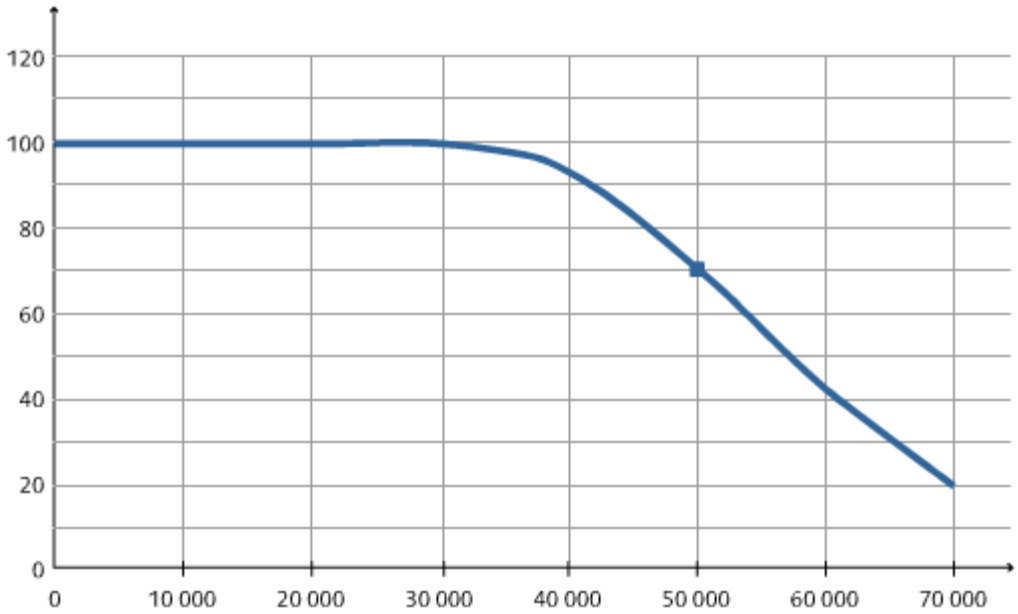
LEDit pystyvät tuottamaan matalalla energiankulutuksella paljon valoa. Niiden valotehokkuus kasvaa nopeasti uusien innovaatioiden syntyessä ja laboratorio-olosuhteissa voidaan saavuttaa jo 276 lm/W valkoisella R&D teho LED-sirulla. Amerikkalainen valaisin- ja lamppuvalmistaja Cree Inc of Durham rikkoi edeltävän ennätyksen 254 lm/W helmikuussa 2013.

Todellisuudessa näitä tehoja LEDille ei pystytä vielä tuotteistamaan, mutta lähitulevaisuudessa se on mahdollista sillä valotehokkuuden vuotuinen kasvu on noin 10 %. Koska ne eivät ole ympärisäteileviä kuten muut valonlähteet, tuotettu valo saadaan hyödynnettyä tehokkaammin ilman heijastumista, joka laskee valonlähteen hyötysuhdetta.

LEDeillä tuotettu valo on suunnattu sirusta normaalisti 120 asteen avautumiskulmaan. LED-sirun tuottamaa valoa voidaan suunnata kuvuilla ja erilaisilla optiikoilla, mutta pääasiassa valoa tuotetaan valonlähteen etupuolelle, josta se on helppo saada hyödynnettyä ilman häviöitä.

Teoreettinen valotehokkuus LED-sirulle on 75–500 lm/W, mutta ongelmana on saada kaikki säteily ulos valonlähteestä. Suurin osa säteilystä on sirun sisällä heijastuvaa valoa, joka on lopulta absorboitunut LED-ytimeen ennen pääsyään ulos sirusta. Tämä johtuu rekombinaatioissa syntyvien fotonien säteilystä satunnaisiin suuntiin rajapinnasta. Mikäli tulevaisuudessa keksitään keino suunnata fotonit haluttuun suuntaan rajapinnasta, nousevat valotehokkuudet merkittävästi.

Valovirran alenema LLMF 0,7 saavutetaan suurimmalla osalla nykyaikaisista LED-siruista 40 000-50 000 tunnin käyttöiässä, kuten kuviossa 19 on esitetty. Käyttöiän ilmaisemisen valmistajat käyttävät lyhennettä L70. Sen tarkoituksena on ilmoittaa LED-sirulle se aika, jonka jälkeen alkuperäisestä valovirrasta on jäljellä 70 %.

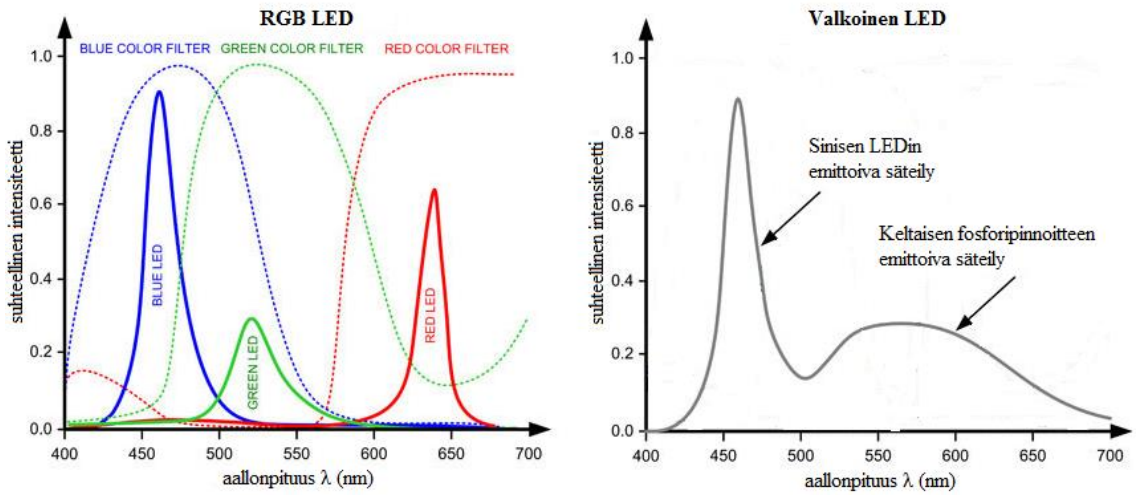


KUVIO 19. LEDin valovirran alenema 50 000 tunnin ajanjaksolla (Fagerhult Oy 2013)

4.5.3 Väriominaisuudet

LEDien värilämpötilaan voidaan vaikuttaa erilaisilla puolijohde materiaaleilla ja niiden yhdistelmillä sekä erilaisilla loisteaine päällysteillä ja värillisillä linsseillä. Valkoinen LED voidaan toteuttaa päällystämällä sininen LED-siru keltaisella fosforilla, jonka loisteaine emittoi valkoisena valona. Värien tuottamiseen käytetään RGB-LEDejä (RED-GREEN-BLUE), joiden kirkkautta muuttamalla voidaan saada aikaan kaikki näkyvänvalon sävyt. RGB-LEDissä samaan koteloon on pakattu kolmea pääväriä (sininen 470 nm, vihreä 525 nm ja punainen 626 nm) säteilevät diodit. Niiden säteilysuhdetta säätä-

mällä aallonpituudet summautuvat ja tuloksena on CIE-1931 värikoordinaatistosta kolmion keskelle muodostuva väriaistimus. Esimerkiksi kaikkien säteillessä yhtä kirkkaasti ovat eripuolilla värikoordinaatistoa olevat pisteet yhtä kaukana toisistaan ja syntyvä valo väriltään valkoista. Normaalisti syntyvä säteily on näkyvänvalon alueella eikä UV- ja IR-säteilyä synny. Kuviossa 20 on esitetty kaksi käytetyintä tapaa tuottaa valkoista valoa LED-sirulla. (Simpson 2003, Schubert 2006)



KUVIO 20. RGB- ja valkoisen LED-valaisimen spektri
(www.ideatoreality.wordpress.com)

Suuri mullistus LED-teknologiassa oli sinisen LEDin keksiminen. Pinnoittamalla sininen hohtodiodi keltaisella fosforiloisteainekerroksella saatiin LED-siru säteilemään valkoista valoa. Tämä mahdollisti LEDien käytön kohdevalaistuksessa ja valotehokkuuden noustessa yhä korkeammaksi voitiin ensimmäiset LED-yleisvalaisimet tuoda markkinoille. (Schubert 2006)

4.5.4 Liitäntälaitteet

Toisin, kuin muut valonlähteet, LED-sirut syttyvät välittömästi ja niiden himmennys pidentää niiden käyttöikää. Päälle/Pois kytkennät sekä himmennys auttavat LEDiä säilyttämään valovirtansa eli hidastaa valovirran alenemaa. Tavallisen LED-sirun himmennyksessä ja ohjauksessa käytetään pulssileveysmodulointia sekä virranohjausta.

Pulssileveysmodulointi (PWM, Pulse-Width Modulation) tarkoittaa kuormalle menevän jännitteen säätöä muuttamalla sen pulssin leveyttä. Sen säätöalue on 0,05-100 %. Esimerkiksi himmennys 50 % valotehoon, toteutetaan hyvin nopeataajuisella jännite kanttiaallolla, jonka lähtösignaalin keskiarvo yhden värähtelyjakson aikana on sama, kuin modulointisignaalin arvo. Kanttiaalto on vuoroin 100 % ja vuoroin 0 %, tarkoittaen LEDin käyttötunnin ottavan todellisuudessa vain 0,5 tuntia. Pulssileveysmoduloinnilla voidaan ohjata myös RGB-LEDien väriskaalaa, jolloin väri-LEDeille syötetään oma ohjaus-signaali. Muuttamalla näiden pulssisuhdetta aikaansaadaan erivärit.

LEDin valovoimakkuutta voidaan säätää myös jatkuvalla virran säädöllä (CCR, Constant Current Reduction), jossa LEDin päästösuuntaista virtaa säädetään lineaarisesti. Säätöalue on 10–100 %. Taulukkoon 6 on kerätty LEDin hyviä ja huonoja ominaisuuksia.

TAULUKKO 6. LEDin ominaisuudet

VAHVUUDET	HEIKKOUDET
• pitkä käyttöikä • hyvä säädettävyys ja nopea säätövaste esim. syttyvät heti • valontuotto kylmässä • ei tuota UV-säteilyä • iskunkestävyys • värintuotto mahdollisuudet ilman suotimia • pieni koko	• herkkä ylivirralle ja estosuuntaiselle jännitteelle -> tuhoutuu • voimakas lämpeneminen, joka kiihtyy lämpötilan noustessa • jäähdytyselementin koko • valonlähteen vaihtaminen eliniän lopussa

5 VALAISTUKSEN ENERGIATEHOKKUUS

Valaistus on kiinteistöjen energiankulutuksessa huomionarvoinen osa. Yli 60 % Euroopan valaistuksesta on toteutettu vanhalla ja hyötysuhteiltaan energiaa tuhlaavalla tekniikalla. Ilmaston lämpeneminen ja sen ympäristövaikutukset ovat saaneet energiankulutuksen ja siitä koituvat hiilidioksidipäästöt suurennuslasin alle. Energiapalveludirektiivin (ESD) ja kansallisten toimenpidesuunnitelmien tavoitteena on aikaansaada 9 % säästöt seuraavan yhdeksän vuoden kuluessa. Taulukossa 7 on esitetty arvio tämän hetken energiansäästöpotentiaalista Suomessa. (Suomen valoteknillinen seura ry, Energiatehokas valaistus esitys)

TAULUKKO 7. Arvio vuoden 2013 energiankulutuksen säästöpotentiaalista. (Suomen valoteknillinen seura, www.valosto.fi)

ALUE	Kulutus TWh/a	Säästö potentiaali TWh/a	%	Lähde
Kotivalaistus	1,6	1,0	62	Motiva
Palvelu- ja julkinen valaistus	4,0	1,2	30	Motiva
Teollisuusvalaistus	1,5	0,4	26	Ruotsin teollisuus
Katuvalaistus	0,9	0,2	22	Kuntaliitto, tilastokeskus
YHTEENSÄ	**8,0 GWh/a**	**2,8 TWh/a**	**30**	

Energiatehokkuus tarkoittaa, että standardin määrittämät valaistusvaatimukset täytetään mahdollisimman energiataloudellisilla ratkaisuilla ilman, että näkömukavuudesta joudutaan tinkimään. Kuviossa 21 on esitetty energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät.

KUVIO 21.Valaistuksen energiatehokkuus tekijät (SVS 2008, 24)

Suunnittelussa tulee huomioida valonlähteen energiatehokkuus, valaisimen hyötysuhde, liitäntälaitteen tekniikka ja siitä koituvat tehohäviöt ja valaistuksen ohjaus läsnäolotunnistuksella sekä päivänvalon mukaan.

5.1. Valaisinten huoltokerroin

Valaisimen huoltokertoimeen vaikuttavia tekijöitä ovat lampun eloonjäämiskerroin, huoneen pintojen likaantumiskerroin sekä lampun valovirran alenema. Huoltokertoimen avulla voidaan arvioida valaistukselle koituvia kunnossapitokustannuksia. Mitä pienempi huoltokerroin on välillä 0-1, sitä suuremmat ovat kunnossapitokustannukset. (Glamox Luxo Lighting Oy, http://glamox.com/fi/ledien-elinik1)

5.2. Valovirran alenema

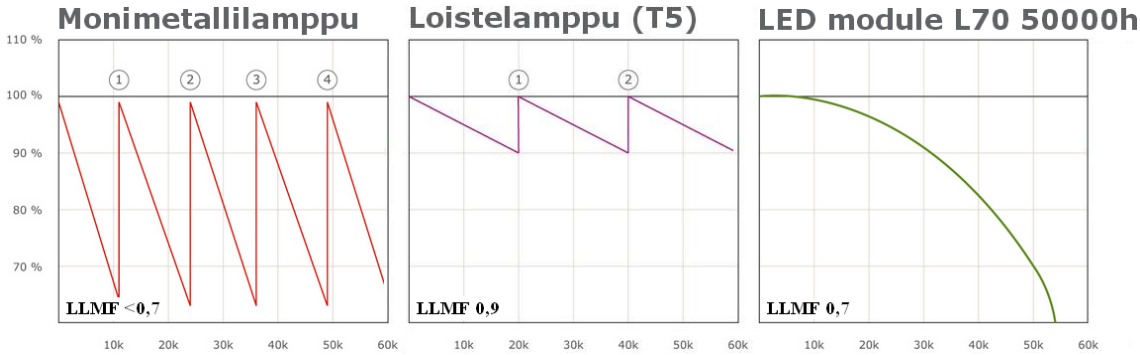
Valonlähteen valovirran aleneminen vaikuttaa myös oleellisesti energiatehokkuuteen. Valonlähdettä valittaessa alenemakertoimen nousu LLMF 0,7:stä 0,8:saan vähentää energian kulutusta noin 12,5 %. Valonlähteiden valovirran alenema on prosenttiluku välillä 0-1, joka kertoo kuinka paljon alkuperäisestä valovirrasta on jäljellä, kun valonlähde tulisi vaihtaa. Hyötypolttoikä määritellään siten, että ilmoitetaan se aika tunteina, jona valovirta laskee tähän ohjearvoon. Valonlähteen ei siis tarvitse sammua, jotta sen vaihto olisi ajankohtainen. Kuviossa 22 on esitetty valaistussuunnittelussa käyttäviä ohjearvoja eri valonlähteiden sallituille valovirran alenemille sekä eri tilojen likaantumiskertoimia.

Valonlähteen valovirranalenema	
T5-loistelamput	0,90
T5C-rengasloistelamput	0,80
T8-loistelamput	0,90
Pienloistelamput	0,80–0,90
Monimetalli (keraaminen)	0,85
Monimetalli (kvartsi)	0,80
Induktiolamput	0,70
Suurpainenatriumlamput	0,90
Elohopealamput	0,70
Halogeenilamput	1,00
Hehkulamput	0,95
LED	0,70

Likaantumisen vaikutus	
Tilan kuvaus	Alenema
Puhdas • toimisto • sairaala • laboratorio	0,85
Keskimääräinen • luokkahuone • myymälä • julkiset tilat	0,75
Likainen • teollisuustila • varasto	0,60

KUVIO 22. Ohjeelliset laskentataulukot valovirran alenemalle sekä likaantumisen vaikutukselle. (Indoor lighting solutions, Fagerhult Oy 2012-2013)

Kuviossa 23 on esitetty valonlähteiden vaihtoväliä suhteessa valovirran alenemaan. Monimetallilampun alkuperäisestä valovirrasta on jäljellä 66 % 12 000 tunnin käytön jälkeen. Se joudutaan vaihtamaan kolme kertaa LED-moduulin 50 000 tunnin elinkaaren aikana, eli neljällä lampulla saavutetaan yhden LED-moduulin käyttöikä. T5-loistelampun alkuperäisestä valovirrasta on jäljellä 90 % 20 000 tunnin käytön jälkeen. Loistelamppuja vaaditaan kaksi ja puoli, jotta 50 000 tunnin käyttöikä saavutetaan.



KUVIO 23. Valonlähteiden valovirran pysyvyys. (Glamox Luxo Lighting Oy, http://glamox.com/fi/ledien-elinik1)

Sisävalaistus standardissa SFS-EN 12464-1-2011 mainitaan, että valovirran alenema tulee huomioida valaistussuunnittelussa. Tilaan lasketut valaistusvoimakkuuden on mitoitettava ohjeellisten alenema kertoimien perusteella, koska valonlähteet menettävät valovirtaansa ikääntyessään sekä likaantuvat tilasta riippuen. Myös huoltotoimenpiteistä tulisi suurissa kiinteistöissä laatia valaistuksen huoltosuunnitelma, jossa määritettäisiin etukäteen valaisimien, seinä- ja kattopintojen puhdistus sekä lamppujen ja tärkeimpien kulutusosien (sytyttimien, kuristimien ja liitäntälaitteiden) vaihtoajankohta. Näillä toimenpiteillä mahdollistetaan tasaiset valaistusolosuhteet koko valaisimen elinkaaren ajan. Toimenpiteet tulisi suorittaa kootusti kaikille tilan valaistukselle, jottei valonsävy- tai teho eroja syntyisi valaisinten välillä.

5.3. LENI-indeksi

Rakennuksen energiatehokkuuden määrittämiseen ja valaistuksen sähkönkulutukseen voidaan pureutua LENI (Lighting Energy Numeric Indicator)-indeksin avulla. LENI-indeksi määritellään standardissa EN 15193 (Energy Performance of Buildings - Energy Requirements for Lighting), joka käsittelee kiinteän valaistuksen energian kulutusta erilaisissa rakennuksissa. LENI-indeksi ilmoitetaan muodossa kWh/m^2/vuosi. Koska

LENI-luku lasketaan koko rakennukselle, voidaan sen arvoa käyttää hyväksi rakennusten välisessä vertailussa. (www.fagerhult.fi)

Standardista (EN 15193) löytyy kaksi menetelmää LENI-luvun määritykseen. Ohjeet valaistuksen energiankulutuksen mittaukseen, jolla lasketut tulokset voidaan tarkastaa. LENI-indeksi voidaan laskea yksinkertaisimmillaan kaavalla 1.

$$\text{LENI} = \frac{\text{valaistuksen kokonaiskulutus vuodessa}}{\text{rakennuksen valaistujentilojen pinta}-\text{ala}} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}\right) \text{vuodessa} \tag{1}$$

esimerkiksi urheiluhallin LENI-indeksi:

$$LENI = \frac{\text{käyttötunnit vuodessa } \cdot \text{valaistuksen kokonaiskuorma}}{\text{rakennuksen valaistujentilojen pinta} - \text{ala}}$$

urheiluhallin valaistuksen normaalikäytölle käsiohjauksella valitaan standardiarvo 4000 tuntia vuodessa (SFS-EN12193, luokka 2, 500 luksia pelialueella), valonlähde 50·250W monimetallipurkauslamppu:

$$LENI = \frac{4000\ h\ \cdot 12{,}5\ kW}{1000 m^2} = \frac{50\ 000\ \text{kWh}}{1000 m^2} = 50\ \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}\right) \text{vuodessa}$$

Kuten taulukosta 8 voidaan huomata, LENI-indeksin arvo 50 vastaa urheiluhallille energiankäyttö-luokkaa 3. Rakennusmääräys kokoelmassa D5 (RakMK D5) esitetään ominaiskulutusarvoja rakennuksille. Energiankäyttöluokka 3 täyttää D5:n energiatehokkuusvaatimukset, mutta valaistuksen tulee muilta osin noudattaa voimassa olevia sisävalaistuksen standardeja ja suosituksia (EN 12464-1-2011). Pelkästään energiatehokkailla valonlähteillä on mahdollista saavuttaa käyttöluokka 3. Kun valaistuksen energiatehokkuutta halutaan parantaa edelleen, otetaan käyttöön läsnäolo- tai vakiovalo-ohjausta.

TAULUKKO 8. LENI-luvut ja energiankäyttöarvot rakennukselle. (Fagerhult Oy, PDF-esitteet, VBE- ja AQ –indeksi)

Tila	LENI-luku (kWh/m²/vuosi)				
Käytävät	≤10	10–15	15–20	20–25	>25
Luokkahuoneet	≤15	15–20	20–25	25–30	>30
Toimistot	≤10	10–20	20–30	30–40	>40
Aulat	≤15	15–25	25–35	35–45	>45
Kokoustilat	≤15	15–30	30–40	40–50	>50
Urheiluhallit	≤40	40–50	50–60	60–70	>70
Teollisuustilat	≤40	40–60	60–80	80–100	>100
Tavaratalot	≤75	75–100	100–125	125–150	>150
Marketit	≤75	75–100	100–125	125–150	>150
Energiankäyttö	**5**	**4**	**3**	**2**	**1**

Energiankäyttö 5 *– Energiatehokkaasti toteutettu valaistusjärjestelmä, jossa valaistus on paikallistettu, siinä käytetään energiatehokkaita valonlähteitä sekä päivänvalo- ja läsnäolo-ohjausta.*

Energiankäyttö 4 *– Energiatehokkaasti toteutettu valaistusjärjestelmä, jossa valaistus on tyypillisesti paikallistettu, siinä käytetään energiatehokkaita valonlähteitä sekä normaalia ohjausta.*

Energiankäyttö 3 *– Nykyaikainen valaistusjärjestelmä, jossa ei ole erityisesti pyritty energiatehokkuuteen.*

Energiankäyttö 2 *– Tehokkuudeltaan heikohko valaistusjärjestelmä.*

Energiankäyttö 1 *– Tehokkuudeltaan heikko valaistusjärjestelmä. Tyypillenen 70-luvun valaistusratkaisu C-luokan kuristimella.*

5.4. EuP-direktiivi

EUP (Energy Using Products)-direktiivi tuli Suomessa voimaan vuonna 2008. Sen tarkoituksena on asettaa rajoituksia EU-alueella sähkölaitteiden energiankulutukselle ja poistaa markkinoilta vanhentuvaa tekniikkaa, jonka hyötysuhde on heikko. EuP-direktiivin tulevaisuuden näkymiä:

Vaihe 2 – kolme vuotta voimaanastumisen jälkeen (2012).

- T10- ja T12-halofosfaattiloistelamput, valotehokkuudeltaan heikoimmat suurpainenatrium- ja monimetallilamput poistetaan myynnistä vähitellen. (kannat E27, E40 ja PGZ12).
- Vuonna 2015 myynnistä poistetaan myös elohopealamput.
- Suurpainepurkauslamppujen liitäntälaitteiden minimitehovaatimusten esittely. Lisäksi otetaan käyttöön pakollinen EEI-merkintä (energiatehokkuusindeksi) kaikissa liitäntälaitteissa. Loistelamppujen liitäntälaitteiden valmiustilatehon tulee olla alle 0,5 W.
- Sisäänrakennetuilla liitäntälaiteilla varustettujen valaisinten tulee olla yhteensopivia kolmannen vaiheen liitäntälaitevaatimusten kanssa lukuun ottamatta valaisimia, joiden kotelointiluokka on vähintään IP 4X. Kaikkien valaisinten pakollisten tuotetietojen tulee löytyä Internetistä ja tuotedokumentaatiosta. Valaisimia koskevat lisäksi samat valmiustilarajoitukset kuin liitäntälaitteita.

Vaihe 3 – määritellään kahdeksan vuotta voimaanastumisen jälkeen (2017).

- Suurin osa monimetallilampuista ja 2-nastaiset pienoisloistelamput poistetaan myynnistä vähitellen (≥ 405 W, kannat E27, E40 ja PGZ12).
- B1-, B2- ja A3-luokan liitäntälaitteet poistetaan myynnistä vähitellen. Lisaksi liitäntälaitetehokkuudelle asetetaan vaatimuksia valonlahteen tehon mukaan.
- Kaikkien liitäntälaitteen sisältävien valaisinten tulee täyttää liitäntälaitteiden kolmannen vaiheen vaatimukset.

(Fagerhult Oy, Indoor lighting solutions 2012-2013)

Energiatehokkuusindeksi (EEI) on luokitusjärjestelmä, jonka mukaisesti ilman sisäistä virranrajoitinta valmistettujen valonlähteiden virranrajoittimet luokitellaan hyötysuhteen raja-arvojen perusteella. Himmennyskäyttöön soveltumattomien virranrajoitinten luokat ovat (hyötysuhteen mukaan alenevassa järjestyksessä) A2 BAT, A2, A3, B1 ja B2 ja himmennyskäyttöön soveltuvien virranrajoitinten luokat A1 BAT ja A1.

Kaasupurkaus valaisimille hyötysuhteen arviointiin voidaan käyttää liitäntälaitteen valmistajan ilmoittamia tietoja. Kaikkien valaisinten pakollisten tuotetietojen tulee löytyä Internetistä ja tuotedokumentaatiosta. (EuP-direktiivin vaihe 2)
(www.valosto.fi)

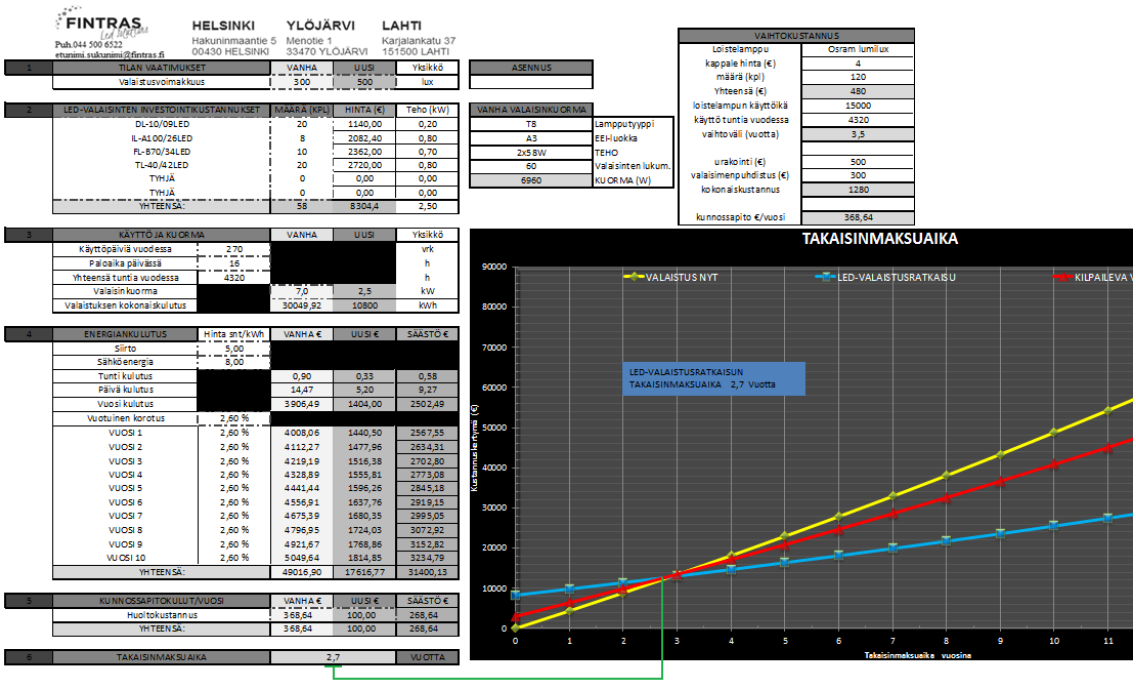
5.5. Ympäristödirektiivit RoHS ja WEEE

Ympäristölle ja terveydelle haitallisten aineiden käyttöä sähkölaitteissa rajoittaa RoHS-direktiivi, joka astui voimaan 1.7.2006. Direktiivi rajoittaa sen piirissä olevien tuotteiden pitoisuusrajoituksia seuraavien aineiden kohdalla: lyijy, elohopea, kadmium, kuudenarvoinen kromi, polybromattu bifenyylieetteri (PBB), polybromattu difenyylieetteri (PBDE). Direktiivi koskee samoja tuoteryhmiä, kuin WEEE-direktiivi (sähkö- ja elektroniikkalaiteromu), lukuunottamatta terveydenhuollon laitteita sekä tarkkailu- ja valvontalaitteita. hehkulankalamput kuuluvat direktiivin piiriin.
(http://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/ymparisto/fi_FI/RoHS-direktiivi/)

6 LED-VALAISTUSRATKAISUN TAKAISIMAKSUTYÖKALU

LED-valaistusratkaisujen korkea hankintahinta on yleisesti kynnyskysymys valaistuksen uudistamishankkeen toteuttamisessa. Suurten tilojen valaistusratkaisuissa käytettävät LED-heittimet ja -syväsäteilijät ovat kaasupurkaus vaihtoehtoihin verraten arvokkaampia, mutta huoltovapaus, pitkä käyttöikä ja energiatehokkuus tuovat säästöjä, joiden vaikutus takaisinmaksuaikaan on merkittävä. Jotta investoinnin kannattavuus voidaan havainnollistaa asiakaskäynnillä yksiselitteisesti, on takaisinmaksuaikaa laskeva työkalu siihen mainio keino. Tässä luvussa on esitelty tämän opinnäytetyön yhtenä osana Fintras Oy:lle kehitettyä takaisimaksutyökalua. Taulukossa 9 on havainnollistettu laskentatyökalun käyttöliittymää.

TAULUKKO 9. Kuvakaappaus takaisinmaksutyökalun käyttöliittymästä



FINTRAS

Puh.044 500 6522
etunimi.sukunimi@fintras.fi

HELSINKI
Hakuninmaantie 5
00430 HELSINKI

YLÖJÄRVI
Menotie 1
33470 YLÖJÄRVI

LAHTI
Karjalankatu 37
151500 LAHTI

1	TILAN VAATIMUKSET	VANHA	UUSI	Yksikkö
	Valaistusvoimakkuus	300	500	lux

ASENNUS

2	LED-VALAISINTEN INVESTOINTIKUSTANNUKSET	MÄÄRÄ (KPL)	HINTA (€)	Teho (kW)
	DL-10/09LED	20	1140,00	0,20
	IL-A100/26LED	8	2082,40	0,80
	FL-B70/34LED	10	2362,00	0,70
	TL-40/42LED	20	2720,00	0,80
	TYHJÄ	0	0,00	0,00
	TYHJÄ	0	0,00	0,00
	YHTEENSÄ:	58	8304,4	2,50

VANHA VALAISINKUORMA	
T8	Lamputyyppi
A3	EEI-luokka
2x58W	TEHO
60	Valaisinten lukum.
6960	KUORMA (W)

VAIHTOKUSTANNUS	
Loistelamppu	Osram lumilux
kappale hinta (€)	4
määrä (kpl)	120
Yhteensä (€)	480
loistelampun käyttöikä	15000
käyttö tuntia vuodessa	4320
vaihtoväli (vuotta)	3,5
urakointi (€)	500
valaisimenpuhdistus (€)	300
kokonaiskustannus	1280
kunnossapito €/vuosi	368,64

3	KÄYTTÖ JA KUORMA	VANHA	UUSI	Yksikkö
	Käyttöpäiviä vuodessa	270		vrk
	Paloaika päivässä	16		h
	Yhteensä tuntia vuodessa	4320		h
	Valaisinkuorma		7,0	2,5	kW
	Valaistuksen kokonaiskulutus		30049,92	10800	kWh

4	ENERGIANKULUTUS	Hinta snt/kWh	VANHA €	UUSI €	SÄÄSTÖ €
	Siirto	5,00			
	Sähköenergia	8,00			
	Tunti kulutus		0,90	0,33	0,58
	Päivä kulutus		14,47	5,20	9,27
	Vuosi kulutus		3906,49	1404,00	2502,49
	Vuotuinen korotus	2,60 %			
	VUOSI 1	2,60 %	4008,06	1440,50	2567,55
	VUOSI 2	2,60 %	4112,27	1477,96	2634,31
	VUOSI 3	2,60 %	4219,19	1516,38	2702,80
	VUOSI 4	2,60 %	4328,89	1555,81	2773,08
	VUOSI 5	2,60 %	4441,44	1596,26	2845,18
	VUOSI 6	2,60 %	4556,91	1637,76	2919,15
	VUOSI 7	2,60 %	4675,39	1680,35	2995,05
	VUOSI 8	2,60 %	4796,95	1724,03	3072,92
	VUOSI 9	2,60 %	4921,67	1768,86	3152,82
	VUOSI 10	2,60 %	5049,64	1814,85	3234,79
	YHTEENSÄ:		49016,90	17616,77	31400,13

5	KUNNOSSAPITOKULUT/VUOSI	VANHA €	UUSI €	SÄÄSTÖ €
	Huoltokustannus	368,64	100,00	268,64
	YHTEENSÄ:	368,64	100,00	268,64

6	TAKAISINMAKSUAIKA	2,7	VUOTTA

6.1. Takaisinmaksutyökalun tarvemäärittely

LED-valaistusratkaisun suunnittelu toteutetaan ennen takaisinmaksuajan laskentaa. Suunnitelman pohjalta saadaan käytettävät valaisintyypit ja määrät. Takaisinmaksutyökalun tarkoitus on huomioida olemassa oleva valaistus ja siitä koituvat vuosittaiset ylläpitokustannukset sekä haluttu valaistusvoimakkuuden taso eri tiloissa. Valmiin tarjouksen yhteydessä voidaan määrittää LED-valaistusratkaisun takaisinmaksuaika.

Laskentatyökalulta toivottiin yksinkertaisuutta ja siistiä ulkoasua. Laskennassa tulisi näyttää vain tärkeimmät osa-alueet, jotta informaatiotulva ei häiritsisi olennaista. Taulukon tulisi olla tulostettava dynaaminen esitys sovituista asioista, joita ovat:

- uudistuksesta saatava valaistusvoimakkuuden korotus
- käytettävät valaisimet, niiden määrät ja hankintahinnat
- asennuksesta ja kaapeloinnista koituvat kustannukset
- käyttöaika päivässä, kuukaudessa ja vuodessa
- valaisinkuorma nyt ja uudistuksen jälkeen
- energiankulutus nyt ja uudistuksen jälkeen
- ylläpitokustannukset nyt ja uudistuksen jälkeen
- uudistuksesta saatavat vuotuiset säästöt
- tarkasteltava aikaväli
- takaisinmaksuaika kuukausina ja sen graafinen esitys
- sähkön- ja siirron hinnan vuotuinen muutos ja sen vaikutus saatavaan säästöön
- kilpailevan valaistusratkaisun takaisinmaksuaika verrattuna LED-valaistusratkaisuun

6.2. Takaisinmaksutyökalun toteutus

Takaisinmaksutyökalua lähdettiin toteuttamaan laskentataulukoksi, joka on myöhemmin mahdollista koodata omaksi ohjelmaksi. Alustaksi työkalulle valittiin Microsoft Excel-taulukkolaskenta sen tunnettuuden ja helppokäyttöisyyden vuoksi. Alustavassa suunnittelussa laskentalogiikasta piirrettiin ”prosessikaavio”, josta löytyi laskentaan tarvittavat muuttujat, niiden väliset riippuvuudet sekä muut laskentaan vaikuttavat tekijät, kuten sähkön hinnan muutos. Kaaviossa oli helppoa seurata kokonaisuutta ja valita asiakkaan kannalta oleelliset laskennan vaiheet. Työkalun tavoite oli pitää käyttöliittymä mahdollisimman yksinkertaisena, jotta asiakkaalle ei esitetä ns. ”ylimääräistä” laskentadataa.

Laskentaan haluttiin sisällyttää mahdollisuus valita valaistusratkaisussa käytettävät valaisimet kätevästi pudotusvalikoista, niitä kuvaavien kategorioiden alta. Lisäksi pudotusvalikoista avautuvien tuoteluetteloiden päivitys ja muokkaus tulisi olla helppoa ja nopeaa. Excel-taulukkolaskennan ominaisuutena ovat välilehdet, joille voidaan taulukoida arvoja esimerkiksi ”tuoteluettelo”-välilehdelle, valaisinten yksikköhinnat, tehot, tehokertoimet, hyötysuhteet, tuotenumerot jne. Käyttämällä P-haku-toimintoa voidaan välilehdiltä poimia käyttöliittymässä valittujen tuotteiden tiedot ja hyödyntää niitä edelleen laskennassa. Soluihin on mahdollista lisätä kommentteja, joiden avulla käyttö on helppo opetella ja omaksua.

Työkalu ei huomioi valonlähteiden hyötysuhdetta, eikä liitäntälaitteiden ja virtalähteiden tehohäviöitä. Nämä tekijät tulisi huomioida jo varsinaisen valaistussuunnittelun, yhteydessä, mutta toiveissa on kehittää laskentatyökalua huomioimaan myös nämä ominaisuudet tulevaisuudessa. Lisäksi ohjauksen vaikutusta energiankulutukseen ja valonlähteen käyttöikään tullaan lisäämään työkaluun.

6.3. Takaisinmaksutyökalun käyttöesimerkki

Tässä käyttöesimerkissä verrataan takaisinmaksutyökalun avulla valaistussuunnitelman mukaista LED-valaistusratkaisua tilassa käytössä olevaan valaistukseen. Laskenta toteutetaan arvioimalla elinkaarikustannuksia valaistusratkaisuille, joiden pohjalta voidaan määrittää uudistuksen takaisinmaksuaika. Graafisessa esityksessä on mahdollista lisätä tarkasteluun mahdollinen kilpaileva valaistusratkaisu, jolla vodaan todentaa kuvaajien avulla tilan kannalta edullisin vaihtoehto.

6.3.1 Tilan vaatimukset

Takaisinmaksutyökalun ensimmäisessä vaiheessa asetetaan tilassa mitattu valaistusvoimakkuus vanhalle valaistukselle ja valitaan haluttu valaistusvoimakkuus uudelle valaistusratkaisulle. Valaistusvoimakkuudet halutaan esittää asiakkaalle, jotta valotason nousu olisi lomakkeessa selkeästi esillä. Tämä on asiakkaalle yksi looginen syy sijoittaa uuteen valaistusratkaisuun, koska uusi LEDeillä toteutettu valaistus parantaa työskentely olosuhteita. Taulukossa 10 on esitetty valaistusvoimakkuuden määrittely. Syötettäviin arvoihin ei sisälly laskentalogiikkaa.

TAULUKKO 10. Valaistusvoimakkuuden määrittely

1	TILAN VAATIMUKSET	VANHA	UUSI	Yksikkö
	Valaistusvoimakkuus	300	500	lux

6.3.2 LED-valaisinten investointikustannukset

Kohdassa valitaan valaistussuunnitelman mukaiset valaisimet sekä määritellään, kuinka monta kyseistä valaisinta halutaan käyttää. Työkalussa on mahdollista valita kuusi eri

valaisinmallia. Valaisinkentässä aukeaa pudotusvalikko, johon päivittyvät kaikki ”tuoteluettelo”-välilehdelle listatut LED-valaisimet kategorioineen. Taulukossa 11 on esitetty pudotusvalikon näkymä, josta voi nopeasti selata suunnitelmassa esitetyn valaisimen mallin. Tuote- ja sähkönumerolla, valaisin täytyy etsiä suoraan tuoteälilehdeltä ja kopioidan malli käyttöliittymään.

TAULUKKO 11. Valaisimien valinta ja asennuskustannusten määrittely

2	LED-VALAISTUKSEN INVESTOINTIMENOT	MÄÄRÄ (KPL)	HINTA (€)	Teho (kW)
	DL-10/09LED	20	1140,00	0,20
	LED-ALASVALOT	8	2082,40	0,80
	DL-07/42LED GU10	10	2362,00	0,70
	DL-10/09LED	20	2720,00	0,80
	DL-10/03LED	0	0,00	0,00
	DL-10/04LED	0	0,00	0,00
	DL-10/05LED			
	DL-10/06LED			
	YHTEENSÄ:	58	8304,4	2,50

ASENNUS

Valaistusratkaisu toteutetaan seuraavilla valaisimilla:

- 20kpl 10W LED-alasvaloja
- 8kpl 100W LED-syväsäteilijää
- 10kpl 70W LED-heittimiä
- 20kpl 40W LED-kiskovalaisimia

Kun valonlähteet ja kappalemäärät on valittu, työkalu täyttää automaattisesti ”tuoteluettelo”-välilehdeltä löytyvät yksikköhinnat ja valaisintehot, sekä laskee yhteen koko investointikustannuksen ja sähköisen valaisinkuorman LED-valaistusratkaisulle.

Asennuksesta voidaan sopia asiakkaan kanssa tässä vaiheessa ja huomioida siitä koituvat kustannukset myös valaistusratkaisun takaisinmaksuajassa. Asennuskustannukselle on taulukossa 11näkyvä kenttä, johon syötetään kertakustannus asennusurakasta. Laskentatyökalu summaa asennuskustannukset investointikustannuksiin, jolloin niiden vaikutus näkyy myös elinkaarikustannuksissa ja takaisinmaksuajassa. Käyttöesimerkissä asennus teetetään kolmannella osapuolella, joten siitä koituvia kustannuksia ei huomioida takaisinmaksuajassa.

6.3.3 Käyttö ja kuorma

Kohdassa määritellään energiankulutus valaistusratkaisuille. Ensin rajataan valaistuksen käyttöjaksot. Käyttötuntimäärä voidaan arvioida esimerkiksi valaistusstandardin SFS-EN12193 mukaisten tilasuositusten mukaisesti, tässä esimerkiksi urheiluhalli 4000 tuntia/vuosi. Esimerkissä käyttöpäiviä on 270 vrk/vuosi, joina valot palavat aikaohjauksella 16 tuntia päivässä. Taulukossa 12 on esitetty käyttöaikojen ja energiankulutuksen määrittely.

TAULUKKO 12. Käytön ja energiankulutuksen kartoitus

3	KÄYTTÖ JA KUORMA		VANHA	UUSI	Yksikkö
	Käyttöpäiviä vuodessa	270			vrk
	Paloaika päivässä	16			h
	Yhteensä tuntia vuodessa	4320			h
	Valaisinkuorma		7,0	2,5	kW
	Valaistuksen kokonaiskulutus		30049,92	10800	kWh

Vanhan valaistusratkaisun energiankulutus voidaan määritellä suoraan työkaluun, mikäli se on tiedossa. Asiakkaat harvemmin osaavat kuitenkaan tätä kertoa, koska valaistuksen energiankulutusta mitataan vielä hyvin harvoin. Vanha valaisinkuorma voidaan syöttää käsin, jolloin työkalu laskee valittujen käyttöaikojen mukaan energiankulutuksen. LED-valaistusratkaisun energiankulutus täydentyy automaattisesti käyttöajan ja työkalun laskelman kokonaistehon tulona.

Vanhan valaistusratkaisun kuorma arvioidaan laskennallisesti. Esimerkiksi vanhan T8-loistevalaisin kuorman arviointi voidaan suorittaa, valaisinten määrän ja yksikkötehojen perusteella, kuten taulukossa 13 on laskettu.

TAULUKKO 13. Valaistuskuorman arviointi.

VANHA VALAISINKUORMA	
T8	Lampputyyppi
A3	EEI-luokka
2x58W	TEHO
60	Valaisinten lukum.
6960	KUORMA (W)

Vanhan valaistusratkaisun hyötysuhdetta voidaan arvioida liitäntälaitteen energiatehokkuusluokan avulla. ”EEI-arvot”-välilehdeltä löytyvät eri loistevalaisimien kuristimien ja liitäntälaitteiden EEI-luokat ja niitä vastaavat hyötysuhteet.

6.3.4 Energiankulutus

”Energiankulutus”-kohdassa muutetaan sähkönkulutus euroiksi. Välilehdellä ”sähkön- ja siirron hintoja” on taulukoitu tilastoja erityyppisille rakennuksille, joista voidaan arvioida hinnat jos tarkkaa arvoa ei ole tiedossa. Esimerkissä siirron kustannus on 5 snt/kWh ja sähköenergian 8 snt/kWh. Lisäksi syötetään sähköenergian vuotuiselle hinnannousulle haluttu prosentti, joka esimerkissä on 2,6 %. Taulukossa 14 havainnollistetaan valolähdevalinnalla saatavaa energiankulutussäästöä kymmenen vuoden ajanjaksolla. Taulukosta on myös luettavissa valaistusratkaisujen tunti- ja päiväkulutus euroissa, joka helpottaa vertailua. Lisäksi voidaan tarkastella sähköenergian hinnannoususta johtuvaa säästöä.

TAULUKKO 14. Energiankulutuksen kustannuskertymä

4	ENERGIANKULUTUS	Hinta snt/kWh	VANHA €	UUSI €	SÄÄSTÖ €
	Siirto	5,00			
	Sähköenergia	8,00			
	Tunti kulutus		0,90	0,33	0,58
	Päivä kulutus		14,47	5,20	9,27
	Vuosi kulutus		3906,49	1404,00	2502,49
	Vuotuinen korotus	2,60 %			
	VUOSI 1	2,60 %	4008,06	1440,50	2567,55
	VUOSI 2	2,60 %	4112,27	1477,96	2634,31
	VUOSI 3	2,60 %	4219,19	1516,38	2702,80
	VUOSI 4	2,60 %	4328,89	1555,81	2773,08
	VUOSI 5	2,60 %	4441,44	1596,26	2845,18
	VUOSI 6	2,60 %	4556,91	1637,76	2919,15
	VUOSI 7	2,60 %	4675,39	1680,35	2995,05
	VUOSI 8	2,60 %	4796,95	1724,03	3072,92
	VUOSI 9	2,60 %	4921,67	1768,86	3152,82
	VUOSI 10	2,60 %	5049,64	1814,85	3234,79
	YHTEENSÄ:		49016,90	17616,77	31400,13

Tarkasteltavana aikajänteenä laskennassa käytetään kymmentä vuotta, jolle laskentatyökalu näyttää energiakustannusten kertymän vuositasolla. Tämä käyttöaika tarkoittaa LED-valaisimelle noin 13,5 tunnin päivittäistä paloaikaa vuoden jokaisena päivänä

kymmenen vuoden ajan, jos käyttöiäksi luvataan LLMF 0,7/50000 tuntia. Tätä käyttöaikaa harvoin saavutetaan kymmenen vuoden aikana, joten LED-valaisinten eliniän jatkuessa valittiin graafinen esitys kuvaamaan elinkaarikustannusten kertymää 15 vuoden aikana.

Takaisinmaksutyökalu ei huomioi LED-valaistusratkaisun uusimista käyttöiän päättyessä, mikäli valaisimiin ei voida vaihtaa LED-moduulia. Vielä hyvin harvat LED-heittimet ja –syväsäteilijät varustetaan vaihdettavalla moduulilla, jolloin valaisinrunko voidaan säästää ja vanha moduuli korvata uudella.

6.3.5 Kunnossapitokustannukset

”Kunnossapitokustannukset”-kohdassa tarkastellaan valaistuksen ylläpito ja huolto/puhdistus kuluja. Kyseessä on arvio valaistukseen kohdistuneista kuluista edellisinä vuosina, kuten valaisimien puhdistus ja lamppujen tai liitäntälaitteiden vaihto. Tähän kohtaan lisätään myös nostinlaitteista ja urakoinnista koituneet laitevuokrat sekä muut vastaavat kulut.

Korvattavaksi eli olemassa olevaksi valonlähteeksi valitaan 150 cm 58W T8 (Osram Lumilux) loistelamppu, jonka kappalehinta on noin neljä euroa. Lamppuja tarvitaan hallin valaisimiin yhteesä 120 kpl. Käyttöiäksi loistelampulle voidaan käyttää 15 000 tuntia ja jakamalla tämä vuotuisella käyttöajalla saadaan lamppujen vaihtoväliksi 3,5 vuotta. Urakoinnissa voidaan laskea ammattilaisen laskuttavan vaihtotyöstä 60€/tunti+nostinvuokra. Loistelamppujen vaihtoon ja valaisinten puhdistukseen voidaan laskea noin 12 tuntia eli arviolta 800 €/vaihto + puhdistus. Kokonaiskustannus jaetaan valonlähteen vaihtovälillä, jotta saadaan vuotuinen kunnossapitoarvio 368,64 €. Taulukossa 15 on esitetty vaihtokustannusten kertymä.

TAULUKKO 15. Valonlähteiden vaihdosta ja puhdistuksesta koituvat kustannukset

VAIHTOKUSTANNUS	
loistelamppu	Osram lumilux
kappalehinta (€)	4
lamppujen määrä (kpl)	120
yhteensä (€)	480
loistelampun käyttöikä (h)	15000
käyttö vuodessa (h)	4320
vaihtoväli (vuotta)	3,5
urakointi (€)	500
valaisimen puhdistus (€)	300
kokonaiskustannus (€)	1280
kunnossapito €/vuosi	368,64

LED-valaistukselle voidaan käytännössä laskea ainoastaan valaisinten puhdistuksesta koituvat kulut, joka käyttöesimerkissä laskettiin 300€/puhdistus kolmen vuoden välein eli 100€/vuosi. Laiteviat ja sammuneet LEDit kuuluvat takuun piiriin 2-5 vuotta, eivätkä näin aiheuta kustannuksia asiakkaalle. Valaistusratkaisuille määritetyt vuotuiset kunnossapitokustannukset sijoitetaan käyttöliittymään, kuten taulukossa 16 on esitetty.

TAULUKKO 16. Vuotuisten kunnossapitokustannusten määrittely

5	KUNNOSSAPITOKULUT/VUOSI	VANHA €	UUSI €	SÄÄSTÖ €
	Huoltokustannus	368,64	100,00	268,64
	YHTEENSÄ:	368,64	100,00	268,64

6.3.6 Takaisinmaksuaika

Laskennan viimeisessä vaiheessa takaisinmaksutyökalu näyttää valaistus uudistuksen takaisinmaksuun kuluvan ajan vuosina. Taulukossa 17 on esitetty käyttöesimerkille määritetty takaisinmaksuaika.

TAULUKKO 17. Takaisinmaksuaika LED-valaistusratkaisulle

6	TAKAISINMAKSUAIKA	2,7	VUOTTA

6.3.7 Käyttöliittymä

Taulukossa 18 on esitetty takaisinmaksutyökalun käyttöliittymä. Näkymä voidaan tulostaa tai yhdistää sähköisen tarjouksen liitteeksi. Laskenta on suoritettu käyttöesimerkin tiedoilla.

TAULUKKO 18. Asiakkaalle tulostettava dokumentti sovituista asioista

	FINTRAS Led Solutions Puh.044 500 6522 etunimi.sukunimi@fintras.fi		HELSINKI Hakuninmaantie 5 00430 HELSINKI	YLÖJÄRVI Menotie 1 33470 YLÖJÄRVI	LAHTI Karjalankatu 37 151500 LAHTI
1	TILAN VAATIMUKSET		VANHA	UUSI	Yksikkö
	Valaistusvoimakkuus		300	500	lux
2	LED-VALAISINTEN INVESTOINTIKUSTANNUKSET		MÄÄRÄ (KPL)	HINTA (€)	Teho (kW)
	DL-10/09LED		20	1140,00	0,20
	IL-A100/26LED		8	2082,40	0,80
	FL-B70/34LED		10	2362,00	0,70
	TL-40/42LED		20	2720,00	0,80
	TYHJÄ		0	0,00	0,00
	TYHJÄ		0	0,00	0,00
	YHTEENSÄ:		58	8304,4	2,50
3	KÄYTTÖ JA KUORMA		VANHA	UUSI	Yksikkö
	Käyttöpäiviä vuodessa	270			vrk
	Paloaika päivässä	16			h
	Yhteensä tuntia vuodessa	4320			h
	Valaisinkuorma		7,0	2,5	kW
	Valaistuksen kokonaiskulutus		30049,92	10800	kWh
4	ENERGIANKULUTUS	Hinta snt/kWh	VANHA €	UUSI €	SÄÄSTÖ €
	Siirto	5,00			
	Sähköenergia	8,00			
	Tunti kulutus		0,90	0,33	0,58
	Päivä kulutus		14,47	5,20	9,27
	Vuosi kulutus		3906,49	1404,00	2502,49
	Vuotuinen korotus	2,60 %			
	VUOSI 1	2,60 %	4008,06	1440,50	2567,55
	VUOSI 2	2,60 %	4112,27	1477,96	2634,31
	VUOSI 3	2,60 %	4219,19	1516,38	2702,80
	VUOSI 4	2,60 %	4328,89	1555,81	2773,08
	VUOSI 5	2,60 %	4441,44	1596,26	2845,18
	VUOSI 6	2,60 %	4556,91	1637,76	2919,15
	VUOSI 7	2,60 %	4675,39	1680,35	2995,05
	VUOSI 8	2,60 %	4796,95	1724,03	3072,92
	VUOSI 9	2,60 %	4921,67	1768,86	3152,82
	VUOSI 10	2,60 %	5049,64	1814,85	3234,79
	YHTEENSÄ:		49016,90	17616,77	31400,13
5	KUNNOSSAPITOKULUT/VUOSI		VANHA €	UUSI €	SÄÄSTÖ €
	Huoltokustannus		368,64	100,00	268,64
	YHTEENSÄ:		368,64	100,00	268,64
6	TAKAISINMAKSUAIKA		2,7		VUOTTA

6.3.8 Graafinen esitys

Graafinen esitys takaisinmaksuajasta päivittyy automaattisesti käyttöliittymän tiedoilla. Välilehdellä ”Takaisinmaksuajan grafiikka” voidaan tarkastella elinkaarikustannuskertymää ajan funktiona. Grafiikkaan on mahdollista lisätä myös kilpaileva valaistusratkaisu. Mikäli kilpailevasta tarjouksesta ilmenee hankintahinta, vuotuinen energiankulutus ja arvio kunnossapitokustannuksista, on vertailu mahdollista suorittaa. Käyttöesimerkissä loistelamppuja korvaava ja LEDien kanssa kilpaileva valaistusratkaisu on monimetallivalaisimilla toteutettu hallivalaistus. Taulukkoon 19 on kerätty graafisessa esityksessä tarvittavat lähtötiedot monimetallivalaistukselle.

TAULUKKO 19. Yhteenveto laskennan arvoista

KUSTANNUKSET	VALAISTUS NYT	LED-RATKAISU	KILPAILEVA
Hankintahinta	olemassa	8 304,40 €	3 000,00 €
Kunnossapito	368,64 €	120,00 €	720,00 €
Energiankulutus	3 931,20 €	1 404,00 €	2527,20 €
Takaisinmaksuaika	-	2,7 vuotta	2,8 vuotta

Kilpailevana valaistusratkaisuna käytetään monimetallivalaisimia, joiden investointikustannukset 150 W:n heittimille ovat noin 100 euroa kappale. Tilaan on kaavailtu asennettavan 30 kappaletta monimetallivalaisimia, joten investointikustannus on noin 3000 €. Energiankulutus on täten arvioitu 4,5 kW:n valaistuskuormalle 4320 tunnin vuotuisella käyttöajalla. Laskennassa ei ole huomioitu liitäntälaitehäviöitä. Esimerkiksi Helvarin elektronisilla A2-luokan liitäntälaitteilla hyötysuhde on noin 90 %, joka vastaa 150 W:n monimetallivalaisimelle noin 20 W:n tehohäviötä. Taulukossa 20 on arvioitu monimetallivalaisinten sähköinen kuorma.

TAULUKKO 20. Valaistuskuorman arviointi

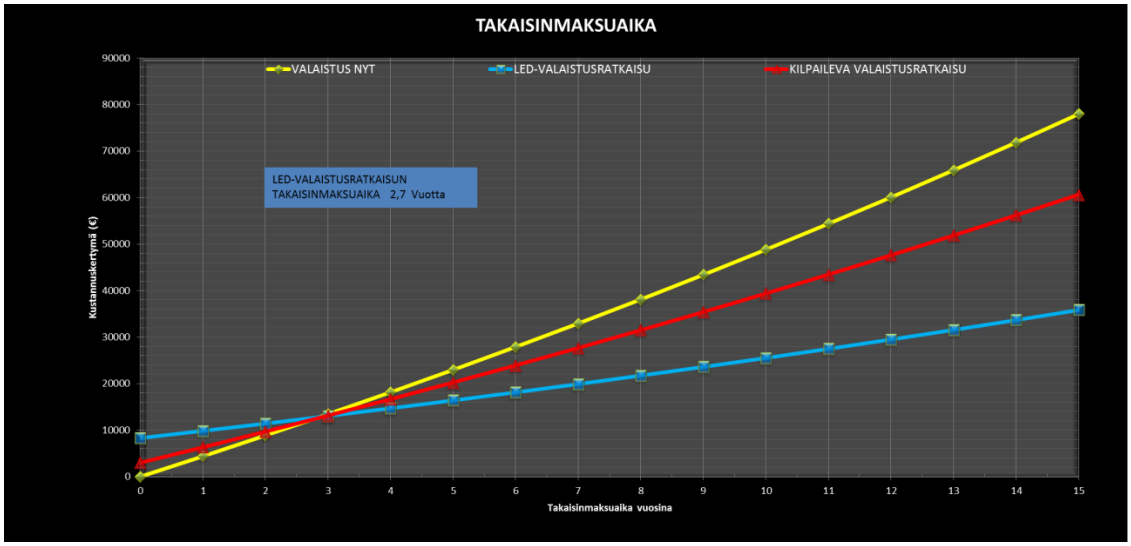
VALAISINKUORMA	
Monimetalli	Lampputyyppi
A2	EEI-luokka
150 W	TEHO
30	Valaisinten lukum.
4500	KUORMA (W)

Taulukossa 21 on määritetty kunnossapidosta koituvat vuotuiset kustannukset.

TAULUKKO 21. Monimetallivalaisinten kunnossapito- ja puhdistusarvio

VAIHTOKUSTANNUS	
monimetallilamppu	Osram HCI-TT 150 W
kappalehinta (€)	40
lamppujen määrä (kpl)	30
yhteensä (€)	1200
lampun käyttöikä (h)	12000
käyttö vuodessa (h)	4320
vaihtoväli (vuotta)	2,8
urakointi (€)	500
valaisimen puhdistus (€)	300
kokonaiskustannus (€)	2000
kunnossapito €/vuosi	720

Kuviossa 24 on esitetty takaisinmaksutyökalun piirtämä elinkaarikustannuskertymä ajan funktiona viidentoista vuoden ajanjaksolla. Siinä esitetään korvattavan valaistusratkaisun elinkaarikustannuksia keltaisella, LED-valaistusratkaisun sinisellä ja monimetallivalaisinten punaisella.



KUVIO 24. Esimerkkikuvaaja takaisinmaksuajan esityksestä

Kuviosta 24 voidaan huomata LED-valaistuksen ja purkauslamppuvaihtoehdon kustannusten leikkaavan noin kolmen vuoden kohdalla, jonka jälkeen LED-valaistusratkaisu tuo selviä säästöjä vuositasolla. Kyseessä on siis sijoitus, joka tuo säästöjä pitkällä aikajänteellä.

6.3.9 Yhteenveto käytöstä

Laskentatyökalu on kompakti ja yksinkertainen tapa vertailla valaistusratkaisuja ja niiden elinkaarikustannuksia. Se huomioi asiakkaan tarpeet ja esittää kustannustehokkaimman tavan niiden täyttämiseen. Esimerkiksi investointikustannuksia on helppo muuttaa vaihtamalla valaisimia tai kappalemääriä, jolloin valaistusratkaisua voidaan räätälöidä asiakkaalle budjetin asettamissa rajoissa.

Takaisinmaksutyökalun välilehdet on tulostettavissa heti asiakaskäynnillä tai työkalun valmiit laskelmat voidaan lisätä sähköisen tarjouksen liitteeksi. Dokumenteista nähdään selkeästi sovitut asiat ja takaisinmaksuaikaan vaikuttavat tekijät.

7 PÄÄTELMÄT

Työn aihe ”LED-valaistuksen takaisinmaksuaika” kuvaa osuvasti tehtyä tutkimustyötä. Sen tarkoituksena oli tutkia valaistusratkaisujen elinkaarikustannuksia ja luoda laskentatyökalun, jolla niitä voidaan vertailla. Työssä tehtiin erillinen elinkaarikustannuksiin keskittyvä osio, joka esitteli työn kannalta oleelliset valonlähteet sekä niiden elinkaaren aikana kertyvät kustannukset. Lisäksi työssä toteutettiin takaismaksutyökalu, jolla voitiin arvioida valaistusratkaisunkannattavuutta. Työn toinen osio käsitteli valonlähteitä ja niiden valo-ominaisuuksien laskentaa perusteellisemmin, mutta tämä valaistusoppaaksi nimetty osio tuotiin vain liitteeksi varsinaiseen opinnäytetyöhön.

Työssä saavutettiin sille asetetut tavoitteet ja vaatimukset. Laskentatyökalu on luovutettu koekäyttöön ja sen päivitys jatkuu käyttäjäpalautteen perusteella. Laajan aiheen vuoksi opinnäytetyöhön kului ennalta arvioitua enemmän työtunteja.

Valaistusratkaisun elinkaarikustannusten pohdinta kannattaa tehdä huolella suunnitteluvaiheessa. Valonlähde valinnoilla voidaan vaikuttaa merkittävästi valaistuksen huoltosuunnitelman sisältöön. Pitkäikäinen ja vähän huoltoa vaativa LED-valonlähde vähentää huoltosuunnitelman kunnossapitotoimenpiteitä ja tuo säästöjä energiankulutuksessa sekä lamppujen, kulutusosien ja niiden vaihtokustannuksissa. Valaisinten puhdistus on tehtävä valonlähteestä riippumatta. LED-valaisimen elinkaarikustannuksia voidaan laskea entisestään, kun valitaan valaisinmalli, joka on varustettu vaihdettavalla LED-moduulilla. Näin valaisimen elinkaaren päätyttyä sen hävityksestä, uuden valaisimen hankinnasta, johdotusmuutoksista ja asennuksesta koituvilta kustannuksilta vältytään, mikäli moduulin ja mahdollisen virtalähteen vaihdolla jatketaan seuraavat 50000tuntia.

Energiatehokkaan LED-valaistusratkaisun hankinnassa investointikustannukset ovat suuremmat, kuin perinteisillä valonlähteillä toteutettavien. Tarkasteltaessa LEDien elinkaaren aikana syntyviä kustannuksia voidaan todeta investointikustannusten maksavan itsensä useimmissa tapauksissa takaisin nopealla aikajänteellä. LED-valaisimen elinkaarikustannuksissa investointikustannukset ovat kuitenkin suuri merkittävä tekijä, kun taas periteisellä valonlähteellä energiankulutuksesta ja kunnossapidosta muodostuu pääosa kuluista.

Laskentatyökalu ei huomioi vielä valaisimien hyötysuhdetta eikä virtalähteen tai liitäntälaitteen tehohäviöitä. Näiden tekijöiden vaikutus energiankulutukseen tulisi punnita valaistussuunnitteluvaiheessa, mutta olisi hyvä lisätä myös laskentatyökaluun. LED-valaisinten käyttämät laadukkaat hakkuriteholähteet ovat hyötysuhteeltaan noin 95–98 %. Tehohäviö ei vaikuta voimakkaasti energiankulutukseen. Sen sijaan LEDeillä korvattavissa vanhoissa loiste- sekä HID-lampuissa EEI-B2-luokan magneettisen kuristimen hyötysuhde saattaa olla, jopa 70 % eli lamppu ottaa liitäntälaitteen tehohäviön vuoksi noin 30 % enemmän sähköenergiaa, kuin pelkästään lampputeholla laskettaessa. Tämän suuruusluokan tehohäviö liitäntälaitteille on laskennassa merkittävä tekijä, joka nostaa korvattavan valaistusratkaisun energiankulutusta ja lyhentää LED-valaistusratkaisun takaisinmaksuaikaa. Lisäksi ohjauksen vaikutus on tarkoitus huomioida työkalun päivityksessä.

Takaisinmaksutyökalu on luovutettu koekäyttöön Fintras Oy:lle. Sen rakenteeseen, ulkoasuun ja ominaisuuksiin tullaan tekemään päivityksiä myyntiedustajien kokemusten sekä asiakkaiden toivomusten perusteella.

LÄHTEET

Arduino, PWM-ohjaus, Luettu 20.3.2013.
http://arduino.cc/en/Tutorial/PWM

Fagerhult Oy. 2011. Indoor Lighting Solutions –Luettelo 2012 – 2013. Fagerhults Belysning AB

Fagerhult Oy, LENI-indeksin laskenta. Luettu 1.3.2013.
http://fagerhult.fi/outdoor/ljusplanering/energidirektivet/berakna-lenitalet.asp

Fagerhult Oy, PDF-esitteet, VBE- ja AQ –indeksi. Luettu 20.3.2013.
http://np.netpublicator.com/netpublication/n72791826

Glamox Luxo Lighting Oy. LEDin elinikä. Luettu 20.3.2013. http://glamox.com/fi/ledien-elinik1

Halonen, L & Lehtovaara, J. 1992. Valaistustekniikka. Espoo: Otatieto Oy

Ramentor Oy, Elinkaarikustannukset, Luettu 1.4.2013.
www.ramentor.com/etusivu/teoria/elinkaarikustannukset/

Schubert, E.F. 2006. Light-Emitting Diodes, second edition. Cambridge: Cambridge

SFS-EN 12464-1. 2011. Valo ja valaistus. Työkohteiden valaistus. Osa 1: Sisätilojen
työkohteiden valaistus. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 15193. 2007. Rakennusten energiatehokkuus. Valaistuksen energiatehokkuus.

Simpson, R.S. 2003. Lighting control technology and applications. Boston: Focal press

SVS ry. 2008. Valaistushankintojen enrgiatehokkuus. Taustaraportti. Versio 4.0. Luettu 5.3.2013.

Sähköala, ympäristödirektiivit, Luettu 9.4.2013
http://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/ymparisto/fi_FI/RoHS-direktiivi/

LIITTEET

Liite 1. Valaistusopas

VALAISTUSOPAS

FINTRAS OY

Jarkko Koivula

Opinnäytetyö
Toukokuu 2013
Talotekniikka
Sähköinen talotekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

SISÄLLYS

LYHENTEET JA TERMIT

I	Valovoima, cd
Φ	Valovirta, lm
E	Valaistusvoimakkuus, lx
E_h	Horisontaali valaistusvoimakkuus, lx
L	Luminanssi, cd/m^2
Q	Valomäärä, lms, lmh
λ	Aallonpituus, nm
A	Pinta-ala, m^2
K	Kontrasti
CSF	Kontrastiherkkyys käyrä (engl. Contrast Sencitivy Funktion)
L_b	Taustan luminanssi, cd/m^2
L_o	Taustaa vasten näkyvän yksityiskohdan luminanssi, cd/m^2
ρ	Heijastuskerroin, 0-1 tarkoittaa prosenttilukua 0-100 %.
cosθ	Valaisimen ja pinnan normaalin välinen kulma, 0°-90°
cosφ	Sähkötehon hyötysuhde, 0-1 tarkoittaa prosenttilukua 0-100 %
θ	Avaruuskulma kaksiulotteisena, °
ω	Avaruuskulma kolmiulotteisena, sr
φ	vaihekulma, °
C	Pituusakselin suuntainen mittaustaso, 0°≤C<360°
I	Intensiteetti, W/nm
K_m	Valotehokkuusvakio, tappisoluilla 683 lm/W, sauvasoluilla 1754 lm/W.
V(λ)	Silmän suhteellinen spektriherkkyys kuvaaja valoisassa
V´(λ)	Silmän suhteellinen spektriherkkyys kuvaaja hämärässä
R, r	Etäisyys valonlähteestä, m
π	Projektio-pinta-ala, m^2
T_c	Värilämpötila termiselle säteilijälle, K
T_{cp}	Ekvalentti värilämpötila luminanssisäteilijälle, K
CIE	Kansinvälinen valaistuskomissio (Comission Internationale de l`Eclairage)

R_a	Värintoistoindeksi, 0-1 tarkoittaa prosenttilukua 0-100%
CRI	Värintoistoindeksi (engl. Color Rendering Index)
NIST	Amerikkalainen mittaus- ja standardivirasto (engl. National Institute of Standards and technology)
CQS	Värintoistoindeksin päivitys (engl. Color Quality Scale)
UV	Ultravioletti, ultravielettisäteily, nm
IR	Infrapuna, lämpösäteily, nm
EuP	Sähkölaitteiden energiadirektiivi (engl. Energy Using Products)
EEI	Energiatehokkuusindeksi (engl. Energy Efficiency Index)
LENI	Energiatehokkuuden indeksi (engl. Lighting Energy Numeric Indicator)
S	Näennäisteho (VA)
P	Pätöteho (W)
Q	Loisteho (Var)
PF	Valaisimen tehokerroin (engl. Power Factory), välillä 0-1
VAC	Vaihtojännite (engl. Volts of Alternating Current)
VDC	Tasajännite (engl. Volts of Direct Current)
Emissio	Atomin energiatilan muutoksessa, vapautuva energian voi synnyttää ilmiön, jossa syntyy fotoni.
Absorbtio	Kun fotoni törmää atomiin, se saattaa siirtää energiansa atomille.
Sironta	Fotoni voi atomiin osuessaan sirota niin, että atomi absorboi sen energian ja emittoi toisen saapuvan fotonin.
HPS	Suurpainenatrium (High Pressure Sodium)
HID	Suurpaineiset purkauslamput (High Intesity Discharge)
LED	Hohtodiodi. Valoa lähettävä elektroniikan puolijohde, jonka toiminta perustuu elektroluminesenssiin (engl. Light Emitting Diode).
RGB-LED	Kolmesta päävärin (punainen, vihreä ja sininen) LED-sirusta muodostettu LED-valonlähde.
CCR	Jatkuvan virran säätö (engl. Constant Current Regulation)
PWM	Pulssinleveysmodulointi (engl. Pulse Width Modulation)

1 JOHDANTO

LED-valaistusratkaisut ovat yleistymässä hurjaa vauhtia valaistuksen, joka osa-alueella ja tulevat lähivuosina korvaamaan suurenosan muun muassa purkaus- ja loistevalaisin tekniikasta. LEDit valonlähteenä ovat todella monikäyttöisiä ja siksi koin aiheen kiinnostavaksi, koska tutkittavaa niiden elinkaarikustannusten ympärillä riittää. Työ tehdään LED-valaistukseen erikoistuneelle Fintras Oy:lle, joka tuottaa itse markkinoille erityyppisiä LED-valaisimia ja -valaistusratkaisuja. Yritys on perustettu vuonna 2005 ja työn ohjauksesta vastaa Ylöjärven toimipisteellä työskentelevä kehitysjohtaja Esa Sointula ja tuotekehityksestä vastaava Kimmo Leskinen. Esa Sointula on ollut perustamassa Fintras yhtiötä ja on yksi kantavista voimista myös innovoinnin ja LED-tuotekehityksen saralla.

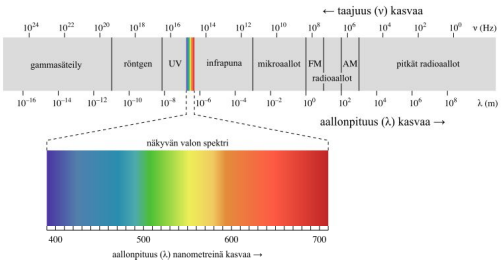
Työntarkoituksena on toteuttaa laskentatyökalu LED-valaistusratkaisun takaisinmaksuajan määritykseen. Laskentalogiikkaa voidaan hyödyntää myynnin tukena asiakaskäynneillä ja sähköisten tarjousten perustana. Suurin ongelma LED-valaistusratkaisuissa ovat korkeat hankintakustannukset, jossa takaisinmaksuajan määrittäminen investoinnille on mainio keino havainnollistaa asiakkaalle tulevaisuudessa saatavat säästöt sekä uudistuksen kannattavuus. Laskennassa on tarkoitus huomioida olemassa olevan valaistuksen kunnossapito- ja energiakustannukset ja verrata niitä LEDillä toteutettavaan valaistusratkaisuun. Takaisinmaksuaika vertailuun on mahdollista lisätä myös kilpaileva tarjous, mikäli tämän yksityiskohdat ovat tiedossa. Tavoitteena on luoda toimiva työkalu päivittäiseen käyttöön, jota on selkeä käyttää, helppo muokata ja nopea päivittää uusien tuotteiden saapuessa. Tuloksena säästetään aikaa ja voidaan selkeästi todeta onko LED-valaistusratkaisu kohteessa asiakkaan kannalta järkevä ja millä valaisinyhdistelmällä se on taloudellisinta toteuttaa.

Takaisinmaksutyökalun tueksi sekä koulutusmateriaaliksi työhön koottiin valaistusopas. Sen sisällöstä haluttiin tuoda Tampereen ammattikorkeakoulun kirjalliseen osioon vain murto-osa ja keskittyä pääasiassa elinkaarikustannusten käsittelyyn.

2 VALO JA VALOSUUREET

Valolla tarkoitetaan näkyvää sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on välillä 350-780nm. Tällä välillä liikkuva säteily toimii ärsykkeenä ihmisen näköelimelle. Valo koostuu fotoneista eli valokvanteista, jotka ovat energiaa välittäviä pienhiukkasia. Fotonien kuljettama energia ja liikemäärä on verrannollinen säteilyn taajuuteen. Mitä suurempi energia fotoniin on varautunut, sitä sinisempää valoa se säteilee. Näkyvän valon fotonilla energia on 1,75–3,1 elektronivolttia.

Valon käyttäytymisestä on esitetty ajansaatossa lukuisia teorioita. Niiden pohjalta on päädytty hyväksymään tosiasia valon kaksinaisesta luonteesta. Valonlähteiden ja valoa vastaanottavien materiaalien kanssa kvanttiteoria pystyy paremmin selittämään ilmiöt, kun taas valon siirtyessä väliaineessa aaltoteoria antaa paremman selityksen. Kyseessä on siis vaativa fysikaalinen ilmiö. Kuviossa 1 on esitetty elektromagneettisen säteilyn eri lajit ja niille ominaiset aallonpituudet. Työssä keskitytään tutkimaan näkyvänvalon ominaisuuksiin ja laatuun. (Halonen, Lehtovaara 1992)



KUVIO 1. Elektromagneettisen säteilyn spektrialueet. (Simpson 2003)

Valon laatua ja sen käyttäytymistä käsitellään valosuureiden avulla. SI-järjestelmässä esitetään valosuureiden perustana oleva valovoima (I). Valovoiman avulla voidaan johtaa kaikki yleisesti valonlaskennassa käytettävät perussuureet ja niiden riippuvuudet.

Perussuureet ja niiden yksiköt ovat esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Perussuureet ja yksiköt (Halonen, Lehtovaara 1992)

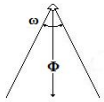
SUURE	SYMBOLI	YKSIKKÖ
valovoima	I	kandela (cd)
valovirta	Φ	luumen (lm)
valaistusvoimakkuus	E	luksi (lx)
luminanssi	L	kandela/neliömetri (cd/m2)
valomäärä	Q	luumensekunti, luumentunti (lms, lmh)

2.1. Valovoima

Valovoiman (I) yksikkö kandela (cd) kertoo, kuinka paljon valoa valonlähde säteilee yhteen suuntaan. Toisin sanottuna suunnattujen luumenien määrä tiettyyn avaruuskulmaan. Se on perussuure, josta muut valosuureet on johdettu.

Valovoiman määritelmä: *"Valonlähteen valovoima tiettyyn suuntaan on yksi kandela (1 cd) silloin, kun valonlähde säteilee monokromaattista, 540 · 10^{12} Hz:n taajuista säteilyä ja sen säteilyteho tähän suuntaan on 1/683 W/sr."*
(Halonen, Lehtovaara 1992)

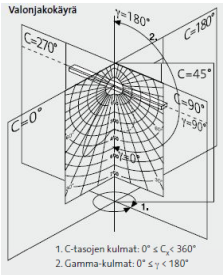
Valovoima lasketaan valovirran ϕ ja avaruuskulman ω funktiona yhtälön 2.1 mukaisesti.



$$I = \frac{\Phi}{\omega} \tag{2.1}$$

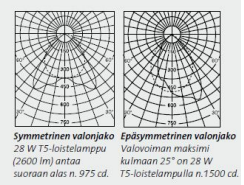
Valaisimen valovoiman kuvaamiseen valmistajat käyttävät yleensä valonjakokäyrää. Se on kuvaaja, joka piirretään napa- eli polaarikoordinaatistoon kuvaamaan sananmukaisesti sitä, kuinka valaisimen valovoima jakautuu eri suuntiin tarkastelukulman funktio-

na. Valonjakautuminen voidaan esittää yhdessä tai kahdessa tasossa. Sillä voidaan mallintaa myös valonjakautuminen erimuotoisille valaisimille esimerkkinä T5 loistevalaisin, jonka valonjakautuma voi olla myös epäsymmetrinen. Valaisimen valonjako mitataan useissa tasoissa valaisimen ympäri. Kuviossa 2 on esitetty valovoiman jakautumista valonlähteelle eri mittaustasoissa.

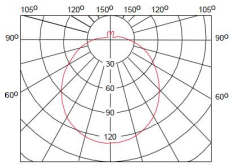


KUVIO 2. Valonjakokäyrän tarkastelusuunnat. (Indoor lighting solutions, Fagerhult Oy 2012-2013)

Valonlähteen pituusakseliin nähden poikittaista tasoa kuvataan ehjällä viivalla, jonka mittaustaso C on 0 astetta. Pituusakselin suuntaista tasoa kuvataan katkoviivalla ja sen mittaustaso C vastaa 270 astetta. Epäsymmetrisillä valaisimilla valovoiman maksimi saavutetaan tässä suunnassa. Valovoiman jakautumisessa käytetään valonjakokäyrille yhteistä skaalausta kandelaa kiloluumenia kohti (cd/klm). Kuvioissa 3 on esitetty symmetrisen sekö epäsymmetrisen valonlähteen valonjakauma napakoordinaatistossa. Kuvio 4 kuvaa valonjakoa pistemäiselle yleisvalolle. (Indoor lighting solutions, Fagerhult Oy 2012-2013)



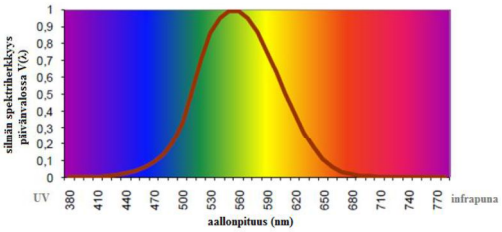
KUVIO 3. Valonjaon esitys napakoordinaatistossa. Sen avulla akselilta voidaan lukea valovoiman arvot eri avaruuskulmiin. (Indoor lighting solutions, Fagerhult Oy 2012-2013)



KUVIO 4. Valonjakokäyrä Defa Astro 260 yleisvalaisimelle, josta on luettavissa valovoima kandelaa kiloluumenia kohti (cd/klm). Valaisin voidaan varustaa eri tehoisilla ja valovirraltaan erilaisilla pienloistelampuilla (kuviossa 4 pienloistelamppu 9W). Valaisimessa on puoliympyrän muotoinen kupu.

2.2. Valovirta

Yksikkö luumen (lm) kertoo valovirran voimakkuuden silmän spektriherkkyysalueella. Koska näkömme ei ole yhtä herkkä kaikille aallonpituuksille valovirta huomioi näkyvän valon voimakkuutta. Kuviossa 5 on esitetty silmän spektriherkkyys päivänvalossa.



KUVIO 5. Silmän spektriherkkyys V(λ) (TAMK opetusmateriaali, Kari Kallioharju 2013)

Valovirran laskennassa kerrotaan valotehokkuusvakio Km (683lm/W), säteilytehon spektriherkkyys $\phi_{e,\lambda}$ (W/nm) ja suhteellinen silmäherkkyysluku V(λ) ja integroidaan näkyvänvalon alueella 380-780nm, yhtälön 2.2 mukaisesti.

$$\phi = \int_{380nm}^{780nm} K_m V(\lambda)\phi_{e,\lambda} d\lambda \tag{2.2}$$

K_m = tappinäkemisen alueella valotehokkuusvakio (683 lm/W),
sauvanäkemisen alueella (1 754 lm/W)
$\phi_{e,\lambda}$ = säteilytehon spektriherkkyys (W/nm)
V(λ) = suhteellinen silmäherkkyysluku

Säteilyteho määritellään säteilyenergiana aika yksikössä ja valovirta valonmääränä aikayksikössä. Näiden laskennassa huomioidaan kuvion 5 esittämä silmän spektriherkkyys V(λ). Kaavassa 2.3 esitetään säteilytehon ja valovirran välinen verrannollisuus.

$$\textbf{SÄTEILY (W)} \rightarrow \textbf{SILMÄN SPEKTRIHERKKYYS V}(\lambda) \rightarrow \textbf{VALOVIRTA (lm)} \tag{2.3}$$

Pinnalle saapuva valovirta voidaan laskea kaavalla 2.4 valaistusvoimakkuuden ja kohteen pinta-alan avulla:

$$\Phi = AE \tag{2.4}$$

ϕ = pinnalle tuleva valovirta (lm)
E = valaistusvoimakkuus (lx)
A = pinta-ala (m^2)

Pinnalta heijastuvaan valovirtaan huomioidaan materiaalin heijastussuhde. Heijastussuhde (ρ) ilmoittaa prosenttilukuna (0..1), kuinka suuri osa pinnalle kohdistuvasta valovirrasta heijastuu pinnalta takaisin. Heijastuvan valon määrä lasketaan yhtälöllä 2.5.

$$\Phi = \rho AE \tag{2.5}$$

(Halonen, Lehtovaara 1992)

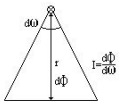
2.3. Valaistusvoimakkuus

Käytetään ilmaisemaan esimerkiksi valaistusjärjestelmän suorituskykyä eli kuinka paljon valoa saadaan tilaan määrätylle pinnalle. Valonlähteen tuottama valovirta kulkee suoraan kunnes se lopulta osuu johonkin pintaan. Riippuen pinnan materiaalista ja muodosta valo käyttäytyy seuraavasti. Se heijastuu, läpäisee pinnan tai absorboituu siihen. Valaistusvoimakkuudessa tarkastellaan neliömetrin kokoista aluetta. Siihen saapuvan valovirran tiheyttä kutsutaan valaistusvoimakkuudeksi. Laskennassa käytetään kaavaa 2.6.

$$E = \frac{\phi}{A} \tag{2.6}$$

E = valaistusvoimakkuus (lx)
ϕ = pinnalle tuleva valovirta (lm)
A = pinta-ala (m^2)

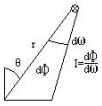
Valaistusvoimakkuuden yksikkönä käytetään luksia (lx), joka vastaa myös valoeksitanssia eli luumenia neliömetrille (lm/m^2). Laskettaessa huomataan suora riippuvuus pinnalle tulevasta valovirrasta ja kääntäen verrannollisesta pinta-alasta. Käänteisen neliölain mukaan etäisyyden kaksinkertaistuminen pudottaa valaistusvoimakkuuden neljänteen osaan. Neliölakia 2.7 käytetään tilanteessa, jossa valo saapuu pinnalle kohtisuoraan pistemäisestä valonlähteestä esimerkiksi LED-sirusta.



$$E = \frac{I}{r^2} sr$$

(2.7)

Kun valo ei saavu pinnalle kohtisuoraan, tulee valaistusvoimakkuuden laskennassa huomioida tulokulma kosinilakia käyttäen kaavalla 2.8. Kyseessä on horisontaali valaistusvoimakkuus E_h, jossa valon saapumiskulma θ kertoo mitattavan pisteen sekä valaisimen välisen suoran r ja pinnan normaalin välisen kulman.



$$E_h = \frac{I_\theta}{r^2} cos\theta$$

(2.8)

E_h = horisontaalivalaistusvoimakkuus (lx)
I_θ = valaisimen valovoima suuntaan θ (cd)
r = etäisyys valolähteestä (m)
cosθ = mitattavan pisteen pinnan välinen kulma (°)

(Halonen, Lehtovaara 1992)

Sisävalaistuksessa valaistusvoimakkuudet vaihtelevat normaalisti 100–1000 lx välillä. Päivällä kirkkaassa auringonpaisteessa voidaan mitata, jopa 100000 lx valaistusvoimakkuuksia, kun taas yöllä luonnonvaloa on vain n. 1-15 lx.
(Indoor lighting solutions, Fagerhult Oy 2012-2013)

2.4. Luminanssi

Valaistusvoimakkuus kuvaa pinnalle tulevaa valovirtaa, kun taas luminanssi pinnalta lähtevää valovirtaa tarkastelu suuntaan. Sen yksikkö on kandelaa neliömetrille (cd/m^2). Luminanssi riippuu (esim. lampun, valaisimen, tason) valovoimasta/pintakirkkaudesta ja projektiopinta-alasta. Sitä hyödynnetään mm. määritettäessä valaistavan tilan ominaisuuksia eli kuinka valo heijastuu eri pinnoista ja materiaaleista. Jos ympäristön luminanssi on hyvin samankaltainen kuin katsottavan kohteen, on muotoja hankala hahmottaa. Suuret luminanssierot taas aiheuttaa häikäisyä. Luminanssi eroja kuvaamaan käytetään kontrastia.

Pinnalta heijastuvan valovirran määrä noudattaa Lambertin lakia. Sen avulla voimme johtaa luminanssin laskentaan yhtälön 2.9 mukaisesti.

$$L = \frac{\rho \times E}{\pi}$$

(2.9)

L = pinnan luminanssi (cd/m^2)
ρ = pinnan heijastussuhde (0…1)
E = valaistusvoimakkuus (lx)
π = projektiopinta-ala (m^2)

Esimerkkeinä yöllä valaistun kadun pinta on suurusluokkaa 2 cd/m^2, taivaankansi 8000 cd/m^2 ja loistelampun pinta noin 10000 cd/m^2.
(Indoor lighting solutions, Fagerhult Oy 2012-2013)

Koska valonlähteet eivät säteile valoa tasaisesti kaikkiin suuntiin voi pintakirkkauden arvo muuttua oleellisesti, kun mittauskulmaa vaihdetaan. (Halonen, Lehtovaara 1992)

2.5. Kontrasti

Kontrastista puhutaan luminanssin ja värierojen havainnoinnissa. Se kertoo näkökentässä olevien pintojen välisen luminanssieron. Laskennassa käytetään kaavaa 2.10.

$$K = \frac{|L_b - L_o|}{L_b}$$

(2.10)

K = kontrasti (cd/m^2)
L_b = taustan luminanssi (cd/m^2)
L_o = taustaa vasten näkyvän yksityiskohdan luminanssi (cd/m^2)
(TAMK opetusmateriaali, Kari Kallioharju 2013)

2.6. Häikäisy

Kontrastiherkkyys on riippuvainen tarkasteltavan kohteen koosta ja taustan luminanssista. Mitä suurempi kohde sitä suurempi on kontrastiherkkyys esimerkiksi tilanteessa, jossa taustana on tasaisesti valaistu laaja pinta. Kontrastiherkkyys aluksi kasvaa nopeasti taustan luminanssin kasvaessa, kunnes suurilla luminanssitasoilla alkaa esiintyä häikäisyä, jonka seurauksen kontrastiherkkyys alkaa laskea. Silmän häikäisykestoisuus on n. 10 000 cd/m^2, jonka ylitys tuntuu näköärsykkeenä epämiellyttävältä ja vaikeuttaa kohteen havainnointia. Häikäisyn voi aiheuttaa suora- tai epäsuora valo. T5 loistelampun tultua markkinoille saavutettiin valonlähteessä 14 000 cd/m^2 pintakirkkauksia. Koska loistelamppu on ympäri säteilevä, voitiin oikeilla heijastinmateriaaleilla nostaa pintakirkkaus 17 000 cd/m^2 valotehokkuuden nostamiseksi. Nämä kirkkaudet ylittivät jo reilusti häikäisyn raja-arvot. Uusilla teho LEDeillä voidaan saavuttaa, jopa 300 000 cd/m^2 pintakirkkaus. Tämä muodostuu ongelmaksi, koska valotehoa halutaan ulos valaisimesta maksimaalinen määrä, mutta häikäisyä täytyy rajoittaa erillisillä optiikoilla. Heijastuminen tai väliaineen läpäisy nostaa valotehon häviöitä. Uudet materiaalit estävät häikäisyä mahdollisimman tehokkaasti, mutta läpäisevät valoa yli 90 %.
(LED-valaisimet PDF-esite, www.fagerhult.fi)

2.7. Värintoistoindeksi

Pintavärit voivat näyttää hyvin erilaisilta eri valaistuksessa. Keinovalaistus vaikuttaa siihen, kuinka luonnollisina värisävyt havaitaan. Valonlähteen värintoistokyky määritellään CIE (Commission Internationale de l'Eglairage) värintoistoindeksin avulla (CIE-17.4). Sitä kuvataan R_a-luvulla, joka on värintoistokeskiarvo testivärinäytteille. Se il-

moittaa prosentuaalisesti (0…100 %) sen, kuinka lähellä valonlähteen (testivalonlähde) lähettämä säteily ja sen spektrinen koostumus on lähinnä olevan luonnolliseksi havaitun valonlähteen (vertailuvalonlähde) spektrin koostumusta. Vertailukohtina käytetään testivärinäytteitä. Osa näytteistä voi näkyä himmeämmin ja osa korostua. Se kuinka värit toistuvat on valonlähteelle yksilöllistä, mutta menetelmän avulla voidaan osoittaa pienetkin erot laajalle valikoimalle eri valonlähteitä.

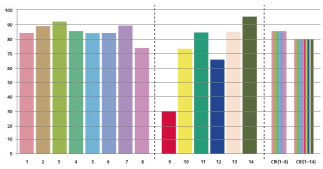
Väritoistoindeksi voidaan ilmoittaa myös merkinnällä CRI, joka on lyhenne sanoista Color Rendering Index ja tarkoittaa samaa kuin standardoitu suure R_a. Se kumpaa tapaa käytetään, riippuu valaisinvalmistajasta. Yleisimmin tunnettu mittausmenetelmä CIE-1974 paljastaa, kuinka testivärien sävyt muuttuvat, kun testivalonlähde muutetaan vertailuvalonlähteeseen. Ellei toisin ole spesifioitu, matalille värilämpötiloille alle 5000 K vertailuvalonlähteenä käytetään vastaavan värilämpötilan omaavaa Planckin säteilijää. Korkeammilla yli 5000 K, vertailuvalonlähteenä käytetään vastaavan värilämpötilan omaavaa päivänvalon spektriä. Auringon valon värintoistokyky keskipäivällä on R_a-100. Mitä lähempänä tätä arvoa valaisimen valontoistoindeksi on, sitä tarkemmin sen valossa valaistun kohteen/pinnan värit hehkuvat kuin auringonvalossa. Valonlähteen värintoistokyky jaetaan viiteen valmistajien käyttämään värintoistoluokkaan, kuten taulukossa 2 on esitetty.

TAULUKKO 2. Värintoistoluokat (Halonen, Lehtovaara 1992)

VÄRINTOISTOLUOKKA	R_a-indeksi	Värintoisto-ominaisuudet
1A	$R_a \geq 90$	erittäin hyvät
1B	$80 \leq R_a < 90$	hyvin hyvät
2	$60 \leq R_a < 80$	hyvät
3	$40 \leq R_a < 60$	tyydyttävät
4	$20 \leq R_a < 40$	välttävät

CIE:n värintoistomittauksessa käytetään 14 Munsellin värinäytettä (Valon CRI indeksi: CIE 177:2007). Kahdeksan ensimmäistä värinäytettä on valittu tasaisesti eripuolilta värisävy-ympyrää. Niillä on keskimääräinen värikylläisyys ja sama valaistusaste keskenään. Näiden mittauksessa puhutaan asteikosta CRI 1-8. Jos jokin näytteistä ei toistu selkeästi voidaan mittauksessa käyttää täydentävää CRI 1-14 asteikkoa. Sen kuusi lisäväriä auttavat löytämään aallonpituudet, joita valonlähde säteilee heikosti. Neljä kuudesta on kylläisiä värejä ja kasi muuta edustaa ihonväriä sekä lehtivihreää. Kuviossa 6

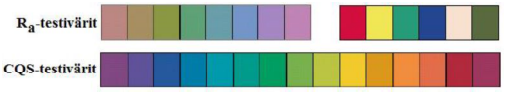
on esitetty CIE-menetelmällä mitatun LED-valaisimen värintoistokykyä. Värinäytteistä kahdeksas (vaalea violetti) toistuu muita testivärejä huonommin. Täydentävillä väreillä nähdään ledille yleinen ongelma punaisen huonosta toistumisesta.
(Fagerhult Oy 2013)



KUVIO 6. CIE:n värintoistomittaus. (LED-valaisimet PDF-esite, www.fagerhult.fi)

Visuaalisilla kokeilla ja simulaatioilla on osoitettu, että CIE:n värintoistoindeksillä saatavat arvot eivät vastaa visuaalisia havaintoja LEDeistä, jotka säteilevät valkoista valoa. Värintoistoindeksi ei siis ole absoluuttinen arvo. Esimerkiksi vertailuvalonlähteenä käytettävä hehkulamppu (2800K) ja päivänvalolamppu (6500K) omaavat saman hyvin korkean Ra-luvun. Vaikka Ra-luvuksi laskettaisiin lähes 100, vertailuvalonlähteiden värintoisto eroaa yhtä paljon toisistaan, kuin testattavasta valonlähteestä. Tämä johtaa tilanteeseen, että kaksi valonlähdettä toistaa värejä eri tavalla, mutta niiden Ra-luku voi olla sama. Mitattaessa LED-valonlähteistä, jotka säteilevät valkoista valoa ja, joiden spektri koostuu kapeista spektrikomponenteista, virhe korostuu. Mittausvirhettä on kokeellisesti määritetty suuruusluokkaan 1-3 yksikköä, mutta näiden LEDien kanssa virhe moninkertaistuu.

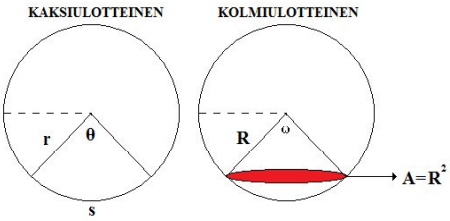
NIST (National Institute of Standards and Technology) on kehittänyt parannusehdotuksen testiväripaletin laajentamisesta CIE:n mittausmenetelmän rinnalle. Sen käyttöä voitaisiin soveltaa myös muilla valonlähdetyypeillä. Kyseessä on mittajärjestelmä CQS (Color Quality Scale). Menetelmä korvaa CIE:n 1964 vanhentuneen W*U*V*väriavaruuden uudella CIE:n 1976 L*a*b* väriavaruudella ja Munsellin 14 testivärinäytteen sarjan Munsellin 15 värin sarjalla. Värit on valittu siten, että ne omaavat korkeimman mahdollisen värikylläisyyden ja kattavat koko värisävy ympyrän. Uudistuksessa käytettävät CQS-testivärit on esitetty kuviossa 7.
(Sormanen 2008)



KUVIO 7. Testivärineytteet. (Sormanen 2008)

2.8. Avaruuskulma

Avaruuskulma on termi, jota käytetään valaisimen valokeilan laskemisessa. Se voidaan kuvata kaksi- tai kolmiulotteisena kuvion 8 mukaisesti.



KUVIO 8. Avaruuskulman tarkastelu. (Halonen, Lehtovaara 1992)

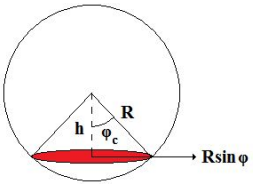
Avaruuskulman alue määritellään pallon avulla, jonka keskipiste on valaisimen vertailukeskipisteessä ja jonka ekvaattori on samansuuntainen maanpinnan kanssa. Yksikkönä käytetään steradiaania (ω) lyhenne sr, joka voidaan laskea yhtälöllä 2.11, jonka apuna voidaan käyttää yhtälöitä 2.12 ja 2.13.

$$\omega = \frac{A}{R^2} = 2\pi(1 - \cos\varphi_c) \tag{2.11}$$

$$A = 2\pi rh \tag{2.12}$$

$$h = r(1 - \cos(\frac{\varphi}{2})) \tag{2.13}$$

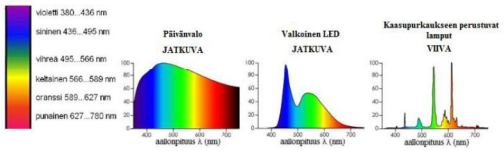
Täysi avaruuskulma on 4π sr. Jos ω = 1sr, kartiokulmalle φ_c=32,8° eli 0,57 rad. Avaruuskulman suuruus steradiaaneina ilmoitettuna on yhtä suuri kuin avaruuskulman määrittelevän kartion pallomaisen pohjan pinta-ala pallon säteen ollessa 1. Kuviossa 9 on esitetty pistemäisen valonlähteen alle muodostuvan valokeilan laskentaa. Valaistava pinta-ala voidaan ratkaista avaruuskulman avulla.
(Halonen, Lehtovaara 1992)



KUVIO 9. Avaruuskulman tarkastelu. (Halonen, Lehtovaara 1992)

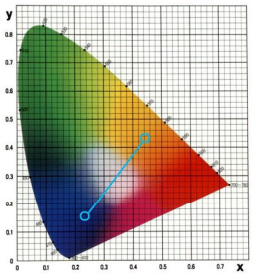
2.9. Valon spektri

Valon spektri tarkoittaa, sähkömagneettisen säteilyn jakautumista eri väreiksi aallonpituuden mukaan. Tarkemmassa tarkastelussa valo saadaan hajotettua väriyhdistelmiksi mm. käyttämällä hilaa tai prismaa. Värit muodostavat spektrin, joka on eri valontuottotavoille yksilöllinen. Termisen säteilijän kuten hehkulampun säteilyenergia perustuu loisteaineen eli volframin atomien ja molekyylien lämpöliikkeeseen. Se saa aikaan värähtelyä kaikilla aallonpituuksilla, jolloin säteilyn spektri on jatkuva. Lisäksi suuriosa säteilystä on UV-alueella. Luminanssi säteilijällä spektri on viivamainen, mikä on ominaista esimerkiksi kaasupurkaus lampuille. Viivojen aallonpituudet vaihtelevat lampun täytöskaasun mukaan, jolloin spektriä kutsutaan ainespektriksi. Siitä voidaan usein erottaa täytös ja loisteaineille ominaiset spektrikomponentit, jolloin väriominaisuuksia voidaan myös säätää muuttamalla aineiden suhdetta. Värien aallonpituudet jakautuvat siten, että sinisen aallonpituus on pienin ja punaisen suurin. Kaikki muut näkyvän valon sävyt sijoittuvat tälle välille. Kuitenkin säteilyenergialtaan sävyjen järjestys on päin vastainen. Kuviossa 10 on värienjakauma sekä valonlähteiden tyypillisiä spektrejä.



KUVIO 10. Näkyvän valon värisävyt ja aallonpituudet. (TAMK opetusmateriaali, Kari Kallioharju 2013)

Luonnollisin väriaistimus saadaan valaisimilla, joilla on jatkuva spektri, koska valonlähde säteilee tasaisesti kaikkia aallonpituuksia. Kaasupurkauslampuille ja ledeille ominainen viivamainen spektri koostuu yhdistelmästä satunnaisia aallonpituuksia, joiden intensiteetti on korkea. Tästä johtuen puuttuvat tai heikosti säteilevät aallonpituudet eivät toistu valaistavassa kohteessa ja esimerkiksi punaisen sävyt näkyvät heikosti.
Päivänvalossa ihmisen näköelin on herkimmillään n.555 nm valossa, mikä vastaa väriltään keltavihreää. Hämärässä silmä on herkimmillään aallonpituuden ollessa n.507nm, jolloin värinäkö alkaa heiketä. Valon värejä voidaan tarkastella väriärsykediagrammin avulla, joka on esitetty kuviossa 11.



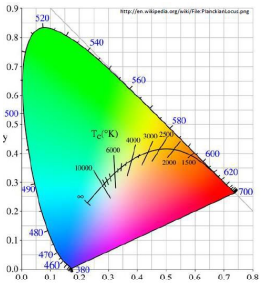
KUVIO 11. Väriärsykediagrammi. (LED-valaisimet PDF-esite, www.fagerhult.fi)

Värikoordinaateista voidaan piirtää spektriura, jonka sisällä kaikki todelliset värit sijaitsevat. Sen reunoilta tai sisältä löytyvät kaikkien valonlähteiden värikoordinaatit, jotka lähettävät näkyvää valoa. Tilanteessa, jossa kahta valoa sekoitetaan keskenään, merkitään alkuperäiset sävyt koordinaatistoon pisteellä. Pisteistä yhdistävältä suoralta löytyvät kaikki värikomponentit, joista valo koostuu. Suoran keskelle osuva alue osoittaa valon näkyvän värin. Esimerkiksi valkoinen valo tehdään yleensä monen värin yhdistelmänä. RGB-LED muodostaa punaisen, vihreän ja sinisen avulla värikoordinaatistoon kolmion, jonka keskellä on valkoinen alue. Tämä on yksi tapa tuottaa valkoista valoa. (TAMK opetusmateriaali, Kari Kallioharju 2013)

2.10. Värilämpötila

Tarkasteltaessa valkoisenvalon sävyä puhutaan valon värilämpötilasta. Standardi CIE-17.4 käsittelee valon värilämpötilaa, jota kuvataan suureella T_c. Valkoisen valon sävy määrittää onko valo näköaistillemme lämmintä, luonnonvalkoista vai kylmän valkoista. Värilämpötilalla voidaan vaikuttaa ihmisen käyttäytymiseen ja se on hyvin olennainen ominaisuus tilan käyttötarkoitusta ja valaistusta suunniteltaessa.

Planckin säteilyn lähteenä toimii musta kappale. Kun mustaa kappaletta lämmitetään ja värilämpötilat eri pisteissä yhdistetään viivalla, saadaan Planckin-käyrä. Kun käyrä sovitetaan CIE:n värikoordinaatistoon, voidaan sen asteikolta lukea kaikkien näkyvää valoa tuottavien valonlähteiden värilämpötilat. Pisteissä 1 000 K värilämpötila vastaa punaista, 3 000K kellertävää, 5 000K valkoista, 10 000 K sinertävää valkoista ja 30 000 K vaaleansinistä valoa. Koska vertailupohjana toimivaa mustaa kappaletta ei ole mahdollista todellisuudessa lämmittää edes 10 000 K vastaavaan lämpötilaan eli 9 726,85 celsiusta on asteikon arvot sen yläpäässä teoreettisia. Värilämpötilalla T_c voidaan siis ilmaista värilämpötila valonlähteelle, jonka väripiste sijaitsee planckin käyrällä. Mikäli väripiste sijaitsee käyrän läheisyydessä, valonlähteen värilämpötilaa kuvataan ekvalentin värilämpötilan T_{cp} avulla. Kuviossa 12 on esitetty Planckin säteilykäyrän muoto ja sijainti värikoordinaatistossa.



KUVIO 12. Planckin säteilykäyrän sijainti värikoordinaatistossa. (TAMK opetusmateriaali, Kari Kallioharju)

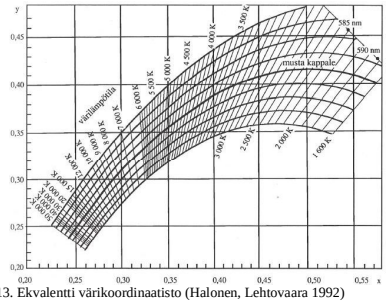
Valontuotto jaetaan kahteen ryhmään, lämpöliike säteilyyn eli termiseen säteilyyn sekä luminesenssisäteilyyn. Termisen säteilijän tuottama näkyvävalo ja sen voimakkuus on verrannollinen säteilijän lämpötilaan. Esimerkiksi hehku- ja halogeenivalaisimet ovat termisiä säteilijöitä, koska valo tuotetaan lämmittämällä lampun sisällä olevaa vastuslankaa johtamalla sähkövirtaa sen läpi. Termisten säteilijöiden värilämpötila on hyvin lähellä planckin eli mustan kappaleen lähettämän säteilyn värilämpötilaa T_c. Luminesenssisäteily on myös näkyvää valoa, mutta sitä ei ole suoraan sidottu säteilijän lämpötilaan. Kaasupurkaus- ja loistelamput, ledit sekä induktiolamput kuuluvat tähän ryhmään. Näiden valonlähteiden lähettämän säteilyn värilämpötila ei aivan vastaa planckin värilämpötilaa. Tästä johtuen näiden valonlähteiden värilämpötilaa kutsutaan ekvivalentiksi värinlämpötilaksi T_{cp}. Taulukossa 3 on esitetty, kuinka värilämpötilat jakautuvat.

TAULUKKO 3 Säteilylähteiden värilämpötilat. (TAMK opetusmateriaali, Kari Kallioharju 2013)

VALONLÄHDE	VÄRILÄMPÖTILA
hehkulamppu	T_c 2700 K
halogeenilamppu	T_c 2900 K
kaasupurkauslamput, loistelamppu, led, induktiolamppu	T_{cp} 2700-6500 K

"Ekvalentti värilämpötila määritellään siksi Planckin säteilyn lähteen lämpötilaksi, jossa säteily on mahdollisimman samanväristä kuin tutkittavan valonlähteen valo." (Halonen, Lehtovaara 1992)

Toisin sanottuna ekvalentti värilämpötila ilmaisee absoluuttista Planckin säteilylähteen vastaavaa lämpötilaa, jossa sen väri muistuttaa eniten tutkittavan valon väriä. Esimerkiksi ekvalentilta värilämpötilaltaan 17 000 kelvinin loisteputket ovat Plankin-käyrän läheisyydessä vaaleansinisellä alueella. Värilämpötilaa voidaan arvioida laskennallisesti kuvion 13 Plankin käyrän pohjalta suunnitellun ekvalentin värikoordinaatiston avulla.



KUVIO 13. Ekvalentti värikoordinaatisto (Halonen, Lehtovaara 1992)

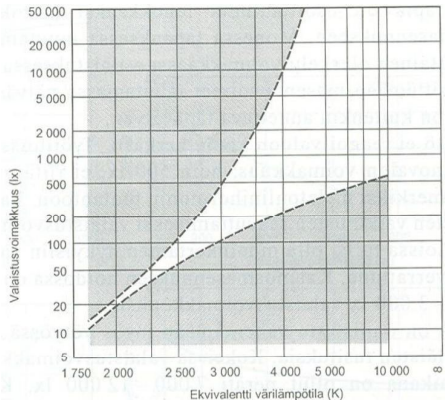
Valon värilämpötilalla ja valaistusvoimakkuudella vaikutetaan myös ihmisen toimintaan. Taulukossa 4 on esitetty, kuinka valkoisen valon värivaikutelmat luokitellaan.

TAULUKKO 4. Värilämpötilojen värivaikutelmat. (TAMK opetusmateriaali, Kari Kallioharju)

VÄRIVAIKUTELMA	EKVALENTTINEN VÄRILÄMPÖTILA
lämmin valkoinen	<3000 K
neuraali/luonnon valkoinen	3300-5300 K
kylmä valkoinen	<5300 K

Myös korkeampi valaistusvoimakkuus lisää ihmisen vireystilaa. Myös altistus valon lyhyille aallonpituuksille (<460 nm) parantaa mm. työskentely tehokkuutta. Tästä syystä sinisävyistä valoa on alettu käyttää työskentely- ja opiskelu ympäristössä. Kylmä väri-

lämpötila vaikuttaa piristävästi, kun taas lämpimän valon vaikutus on päinvastainen eli koetaan rentouttavaksi. Jos valaistusvoimakkuutta nostetaan, on valon värilämpötilalla suuri merkitys, kuinka se koetaan miellyttävänä. Kuviossa 14 havainnollistetaan tätä riippuvuutta.



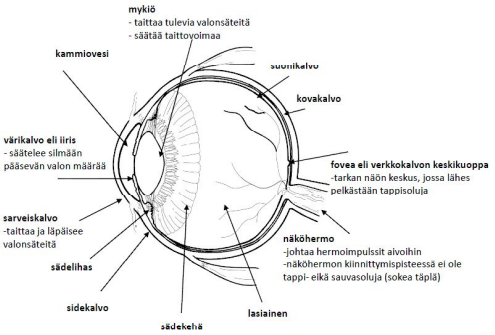
KUVIO 14. Kruithofin käyrät. Valaistus koetaan miellyttävän, kun valovoimakkuus ja ekvalentti värilämpötila pysyy sovitetaan tilaan siten, että pysytään käyrien rajoittamalla valkoisella alueella. (Sähköinfo, valaistustekniikka)

3 NÄKEMINEN

Jotta voidaan tutustua tarkemmin valontuotto tapoihin, on tärkeää tuntea näkemisen perusteet ja näköelimen biologinen toiminta. Voidaan sanoa, että näköaistin avulla ihminen havainnoi 80 % ulkoisista ärsykkeistä verrattuna muihin aisteihin. Tämän vuoksi myös valaistuksen vaikutus ihmisen tuntemuksiin ja käyttäytymiseen on merkittävä. Näkemiseksi kutsutaan hyvin monimutkaista tapahtumaketjua. Silmään saapuva näköärsyke vastaanotetaan soluihin. Hermoratoja pitkin sähköimpulsseiksi muutettu ärsyke siirretään eri puolille aivoja, joissa se käsitellään ja muodostetaan näköhavainnoksi.

3.1. Silmän rakenne

Silmä on valon keräämiseen erikoistunut elin. Se edellyttää aivoilta kykyä käsitellä vastaanotettavaa hermoimpulssia ja muodostaa sen pohjalta kuva ympäristöstä. Aikuisella silmän halkaisija on noin 24mm. Sen koostuu ohutseinäisestä kalvosta, joka mahdollistaa pyöreän muodon ja näin hyvän liikkuvuuden luisessa silmäkuopassa. Silmän etuosa on kirkasta vesimäistä nestettä ja takaosa koostuu hyytelömäisestä nesteestä nimeltä lasiainen. Silmän tärkeimmät on esitetty kuviossa 15.



KUVIO 15. Silmän rakenne (TAMK opetusmateriaali, Kari Kallioharju 2013)

Sarveiskalvo on läpikuultava kerros silmän ulkopinnassa. Kyynelnesteen ja silmäluomen avulla se pysyy kirkkaana ja toimii näin ensimmäisenä taittopintana valolle. Sarveiskalvo yhdistyy sitkeään kovakalvoon, joka ympäröi silmän takaosaa suojaten sisäisiä kudoksia.

Kammiovesi on sarveiskalvon takana ja tekee sarveiskalvosta joustavan ja hyvin valoa läpäisevän rakenteen.

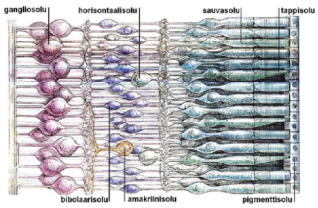
Iiris on värikalvo, joka säätelee silmään saapuvan valon määrää muuttamalla sen keskellä olevan mustuaisaukon eli pupillin kokoa. Mustuaisaukkoa ympäröi rengaslihas, joka supistuu valomäärän lisääntyessä ja estää häikäisyä. Iriksen sädelihakset laajentavat mustuaista valomäärän laskiessa ja edes auttavat näköaistia saamaan riittävästi valoa hämärässä. Aukon läpimitta vaihtelee 2-8 mm. Tämä ei kuitenkaan yksin riitä mukauttamaan näköaistia valo-olosuhteiden muuttuessa, koska hämäränäkö vaatii aikaa alkaakseen toimia. Silmän mukautuminen lähi- ja kaukotarkennuksessa aiheuttaa myös mustuaisen aukon vaihtelua

Mykiö on läpinäkyvä verisuoneton linssi, joka taittaa silmään tulevia valosäteitä ja säätää taittokulman sellaiseksi, että kuva säilyy terävänä verkkokalvolla eri etäisyyksille katsottaessa. Sädelihakset säätävät mykiön muotoa ja paksuutta halutun taittovoiman saavuttamiseksi ja ne ympäröivät mykiötä sen etureunassa. Mykiö on muodoltaan kaksoiskupera. Sen takapinta on kuperampi kuin etupinta, joka mahdollistaa valon riittävän taittumisen. Kauas katsottaessa sädelihakset ovat lepotilassa, kannatinsäikeet ovat kireällä ja mykiön taittovoima pienimmillään. Tällöin mykiö on muodoltaan laajentunut. Kun taas katsotaan lähietäisyydelle, kuvan muodostus verkkokalvolla epätarkentuu ja aivot lähettävät hermoimpulssin sädelihaksille. Ne reagoivat puristamalla kannatinsäikeitä lähemmäs mykiötä, jolloin säikeet löystyvät ja mykiö pyöristyy taittovoiman parantamiseksi.

Sädekehä on mykiön takana ja kiinnittyy reunoistaan myös iiriksen värikalvoon. Mykiön kannattajasäikeet kiinnittyvät sädekehän poimuihin, josta erittyy silmän sisään nestettä, joka puhdistaa tuo ravinteita ja puhdistaa kuona-aineita.

Verkkokalvo sijaitsee silmän takaseinämällä lasiaisen ja suonikalvon välissä. Sen pinnalla on n.130 miljoonaa valoa aistivaa solua, jotka vastaan ottavat valon säteitä ja

muuttavat ne hermoärsykkeiksi. Ne aistivat valon voimakkuuden ja värierot. Soluista hermoärsykkeet siirtyvät näköhermoon, joka johtaa ne edelleen eripuolille aivoja analysoitaviksi. Kuviossa 16 on esitetty verkkokalvon solukerrokset.



KUVIO 16. Verkkokalvon solukerrokset (TAMK opetusmateriaali, Kari Kallioharju 2013)

Valon läpäistessä sarveiskalvon ja mykiön se saapuu verkkokalvon solukerroksiin. Alin kerros muodostuu tappi ja sauvasoluista, jotka sisältävät valoa absorboivaa näköpigmenttiä. Solut eivät ole tasaisesti verkkokalvolla vaan ovat sijoittuneet siten, että näkökentän keskellä keltatäplän alueella on lähes ainoastaan tappisoluja, jotka muodostavat herkimmän alueen verkkokalvolla. Keltatäplän ulkopuolella sauvasolujen määrä kasvaa ja tappisolujen määrä vähenee, mitä ulommaksi kohti verkkokalvon laitoja edetään. Keskellä keltatäplää on tarkannäön keskus eli fovea. Sen alueella on pääasiassa vain pidemmän aallonpituuden tappisoluja. Verkkokalvolla on pieni sokeatäplä, johon näköhermo kiinnittyy. Sen alueella ei ole sauva eikä tappisoluja, joten nimensä mukaan alueelta ei välity hermoärsykkeitä aivoihin.

Suonikalvo on verkkokalvon takana oleva verisuonten peittämä alue. Se huolehtii verkkokalvon solujen ravinnon saannista ja kuljettaa pois kuollutta solukkoa ja kuona-aineita.

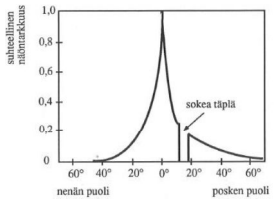
Näköhermo kiinnittyy verkkokalvoon gangliosolujen hermosäikeisiin. Se välittää solukon aistimia hermoärsykkeitä salaman nopeasti eri puolille aivoja.
(Halonen, Lehtovaara 1992)

3.2. Keskeinen näöntarkkuus

Kun katsomme lähellä toisiaan olevia yksityiskohtia, silmän kykyä nähdä ne erillisinä kappaleena kutsutaan keskeiseksi näöntarkkuudeksi. Terveystarkastuksesta tuttu näkötesti, jossa tunnistetaan erikokoisia ja eriasennoissa olevia E symboleita (Snellenin E-kirjaintaulukko) valkoiselta taululta mittaa juuri tätä ominaisuutta.

"Näöntarkkuus määritellään pienimmän kulmaminuutteina mitatun näkökulman käänteisarvona, jossa silmä pystyy selvästi näkemään erillisenä kaksi yhdensuuntaista mustaa viivaa valkoisella pohjalla."
(Lähde: Liisa Halonen – Jorma Lehtovaara, Valaistustekniikka)

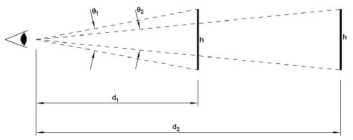
Pienimmän kulman ollessa 0,5 kulmaminuuttia saadaan näön tarkkuudeksi 2,0, joka vastaa erittäin hyvää näöntarkkuutta. Näöntarkkuuden arvo ilmoitetaan desimaalilukuna. Normaalisti näöntarkkuus vaihtelee välillä 1,0–1,5. Esimerkiksi ajokortin saamiseksi, silmälaseilla korjatun näöntarkkuuden tulee olla vähintään 0,5. Kuviossa 17 on esitetty oikean silmän näöntarkkuutta.



KUVIO 17. Oikean silmän suhteellisen näöntarkkuuden riippuvuus katsesuunnan ja näkökohteen suunnan välisestä kulmasta. (Halonen, Lehtovaara 1992)

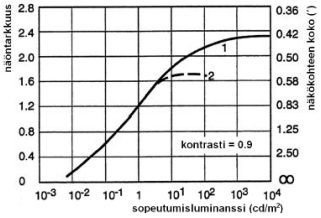
Silmän tarkan näön keskusta kutsutaan foveaksi. Kun asettaa käden suoraksi eteensä peukalo ylöspäin, voidaan kuvitella fovean olevan näkökentässämme peukalonkynnen kokoinen alue. Tarkan näön alueen ulkopuolella tarkkuus heikkenee nopeasti verkkokalvon reunoja lähestyttäessä. Fovea kattaa vain noin prosentin näkökenttämme alasta, mutta tältä alueelta saatavan tiedonkäsittelyyn aivoissa näköaistimme käyttää noin puolet kapasiteetistaan. Silmäsairaudet, kuten kaihi aiheuttavat näöntarkkuuden alentumista.

Heikkonäköisyyden rajana pidetään 0,3 arvoa. Kuviossa 18 on esitetty, kuinka näöntarkkuutta voidaan tarkastella.



KUVIO 18. "Kun kohteen koko on pituusyksiköissä h ja tarkasteluetäisyys d_1, voidaan näkökulma θ_1 määrittää likiarvona $\theta_1 \approx h/d_1$ radiaania. Vastaavasti määritetään $\theta_2 \approx h/d_2$ radiaania. 1,0 radiaania on 3 438 kulmaminuuttia."
(Halonen, Lehtovaara 1992)

Kohde, jota haluamme katsoa asetetaan näkökenttämme keskelle, jossa fovea sijaitsee ja tarkkuus on suurin. Näöntarkkuuteen vaikuttaa olennaisesti myös ympäristön sekä kohteen luminanssi ja niiden välinen kontrasti. Kun luminanssi on samaa suuruusluokkaa näkökenttämme reunoilla ja keskustassa, näöntarkkuus on suurimmillaan. Kun ympäristön luminanssi laskee esimerkiksi iltahämärässä, valaistu patsas näkyy kirkkaampana, mutta näöntarkkuus heikkenee ylittäessään sopeutumisluminanssin maksimiarvon. Tätä riippuvuutta on esitetty kuviossa 19.



KUVIO 19. Näkötarkkuuden riippuvuus ympäristön luminanssista, kun ympäristön luminanssi ≈ kohteen luminanssi (käyrä 1), ja kun ympäristö on tumma (käyrä 2). (TEL-1560 Valaistustekniikan perusteet, Nurmi & Kärnä 2008)

Valon väri ja sen taajuus vaikuttaa myös osaltaan näön tarkkuuteen. Yksi taajuisessa valossa silmän optinen järjestelmä ei aiheuta suurta väripoikkeamaa. Tästä johtuen esimerkiksi moottoriteillä käytetään usein vain oranssin aallonpituutta säteilevää pienpainenatrium valaisinta, jonka Ra-luku on 0. Värintoisto on olematon, mutta näön tarkkuus paranee hämärällä. (Halonen, Lehtovaara 1992)

3.3. Näkökenttä

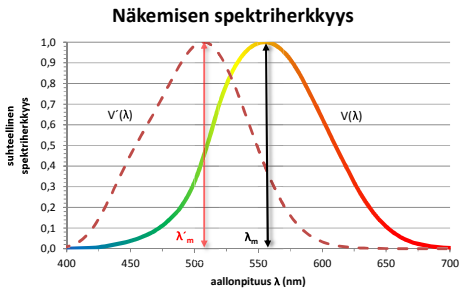
Molemmilla silmillä katsottaessa näkökenttä kattaa vaakatasossa 180 astetta, vaakatason alapuolelle 70–80 astetta ja yläpuolelle 50–60 astetta riippuen otsan ja poskien muodosta. (Värinäkö ei toimi koko näkökentän alueella.) Kuten sanottu näön tarkkuus vaihtelee näkökentän alueella. Näkökentän keskialueella sijaitsee keltatäpläksi kutsuttu alue, jossa myös tarkan näön keskus sijaitsee. Se mahdollistaa tarkkojen kuvien muodostamisen, kun silmä tarkentaa kohteessa useaan eri pisteeseen lyhyessä ajassa. Kun liikutaan näkökentässä lähemmäksi reuna-alueita, tarkkoja kuvia ei synny. Reuna-alueilla hahmotetaan vain liikettä ja epäselviä hahmoja. Tätä aluetta voidaan kutsua niin sanotuksi liikkumisnäöksi. Hämärässä näkeminen tapahtuu ainoastaan sauvasolujen avulla. Koska tarkannäön keskuksessa on ainoastaan tappisoluja, katoaa kyky tarkkojen kuvien muodostamiseen täysin, valomäärän laskiessa tarpeeksi.

3.4. Hämärä- ja värinäkö

Väriaistimus luodaan verkkokalvolla, jossa on kahdenlaisia valoa eli fotoneita absorboivia fotoreseptoreita. Verkkokalvon pintaa peittävää n.6-7 miljoonaa tappisolua ja 120 miljoonaa sauvasolua. Tappisolut toimivat värinäön perustana ja sauvasolut alkavat toimia hämärässä kun värinäkö heikkenee. Tappisolut jaetaan kolmeen ryhmään niiden aallonpituus absorptioherkkyyden mukaan sini-, viher- ja punaherkkiin. Tämä rajaa ihmisen värinäön aallonpituus alueelle 350–780 nm. Tappisolujen absorptio huiput ovat punaherkillä 577 nm, viherherkillä 540 nm ja viherherkillä 447 nm.

Väriaistimus saa alkunsa kun silmään säteilee valoa, joka antaa ärsykkeen soluille. Valkoinen valo aistitaan, kun kaikkia tappisoluja ärsytetään yhtä aikaa. Solut siirtävät sähköiset hermoimpulssin näköhermolle, joka välittää ne edelleen eripuolille aivoja, jossa

impulssit yhdistetään ja syntyy väriaistimus. Normaalivalaistuksessa näkeminen tapahtuu lähes yksinomaan tappisolujen avulla. Valon aallonpituuden spektriherkkyys kuvaajasta 20 (V(λ)-käyrä) voidaan nähdä, kuinka valoisuusaistimuksen voimakkuus vaihtelee, kun valotehokkuus muuttuu. Tätä päivänäkemistä kutustaan fotooppiseksi näöksi.



KUVIO 20. Tappisolujen ja sauvasolujen spektriherkkyys (Halonen, Lehtovaara 1992)

Tappisolujen spektriherkkyys on huipussaan 555 nm kohdalla, joka vastaa värisävyltään kellanvihreää valoa. Huipusta herkkyys kuitenkin laskee sekä punaiseen että siniseen päin mentäessä. Valotehokkuuden laskiessa silmän spektriherkkyys huippu siirtyy sinisen suuntaan, koska sauvasolut alkavat vastaanottaa ärsykkeitä ja lopulta näkeminen tapahtuu ainoastaan niiden avulla. Tätä siirtymäaluetta kutsutaan mesooppiseksi alueeksi. Silloin spektriherkkyys on suurimmillaan 507 nm:n aallonpituudella kuvaaja (V´(λ). Hämäränäköä kutsutaan skotooppiseksi näkemiseksi.

Hämärässä silmä on siis herkempi sinisen sävyiselle valolle ja punaisen sävyt alkavat häipyä. Värillisten kohteiden näkemisessä tapahtuu muutoksia ja värit alkavat himmentyä. Kun näköaistimus tapahtuu kokonaan sauvasolujen avulla, aivoissa ei synny lainkaan väriaistimuksia. (Halonen, Lehtovaara 1992)

3.5. Kontrastiherkkyys ja kontrastinäkö

Kun katsotaan kohdetta, sen yksityiskohtien erottuminen perustuu luminanssi- ja värierojen havaitsemiseen. Kohteen ja taustan luminanssieroa kutsutaan luminanssikontrastiksi. Kaava 3.1 esittää luminanssikontrastin laskennassa käytettävää yhtälöä.

$$\textbf{luminanssikontrasti} = \frac{\textbf{taustan luminanssi} - \textbf{kohteen luminanssi}}{\textbf{taustan luminanssi}} \tag{3.1}$$

Luminanssikontrastin lisäksi värikontrasti vaikuttaa kohteen näkyvyyteen. Silmä kykenee erottamaan kaksi pintakirkkaudeltaan eli luminanssiltaan saman sävyistä pintaa tilanteessa, jossa niiden väriero eli värikontrasti on erilainen. Silmä ei kuitenkaan pysty arvioimaan tarkasti pinnan luminanssia, joka on valaistu tasaisesti saman sävyisellä valolla. Taas luminanssieroja se havaitsee hyvin tarkasti, koska silmän kontrastiherkkyys on suuri. Sen huippuarvoksi on mitattu 500, joka vastaa pienimmän näkyvän kontrastin arvoa 0,002. Näkökentän laidoilla kontrastiherkkyys laskee merkittävästi. Näköhavainto kontrastierosta äärinäkökentässä synnyttää kuitenkin yhtä voimakkaan näköaistimuksen, kuin havainto keskeisessä näkökentässä. Tällöin puhutaan kontrastikynnyksestä.

Kontrasti herkkyyttä silmälle voidaan mitat testin avulla, jossa tumman ja vaalean juovan luminanssia muutetaan sinikäyrän muotoisesti. Kuvion kontrastiherkkyys määritellään kontrastikynnyksen käänteisarvona. Kuivion siniaallon taajuutta muutetaan ja kontrastia eli luminanssieroa lasketaan, kunnes testihenkilön kontrastikynnys ylittyy eikä kuviota pystytä enää havaitsemaan taustasta. Mittaus tehdään useille eri taajuuksille ja saaduista kynnysarvoista voidaan laskea ja mallintaa kontrastiherkkyyskäyrä CSF (Contrast Sensitivy Function), kuvaamaan ärsykkeiden siirtymistä silmästä näköjärjestelmään. Voidaan todeta että kontrastiin ja kohteen havainnointiin vaikuttaa seuraavat tekijät: koko, valaistustaso, varjon muodostus sekä väri. (Halonen, Lehtovaara 1992)

3.6. Sopeutuminen

Valo-olosuhteiden muuttuessa silmällä on kyky sopeutua näkökentän muuttuviin luminansseihin. Valon pääsyä silmään voidaan säätää esimerkiksi mustuaisen aukolla, joka laajenee tai supistuu tarvittaessa. Verkkokalvon sopeutumiskyky muuttuvaan valonmäärään on kuitenkin merkittävämpi tekijä. Se pystyy itse säätämään valonastinta herkkyyttä, fotokemiallisien prosessien ja hermostollisten säätelymekanismien avulla. Sopeutumistaso tarkoittaa silmän pyrkimystä sopeutua näkökentän luminanssin määräämään tasoon. Valo-olosuhteiden muuttuessa valoa vastaanottavien solujen suhde muuttuu. Taulukossa 5 on esitetty valotasot, joilla eri solut toimivat.

TAULUKKO 5. Solujen toiminta alueet (Halonen, Lehtovaara 1992)

Luminanssin ollessa:	Näkeminen tapahtuu	Spektriherkkyys
$10^{-6}\ldots10^{-2}$ cd/m^2	sauvasoluilla	skooppinen
$10^{-2}\ldots10$ cd/m^2	sauva- ja tappisolujen yhteinen alue	mesooppinen
yli 10 cd/m^2	tappisoluilla	fotooppinen

Tappisoluilla nähdään sopeutumisluminanssin ylittäessä 10 cd/m^2. Ylärajana voidaan silmän häikäisykestoisuuden arvoa, joka saavutetaan noin 10 000 cd/m^2. Silmä kykenee sopeutumaan kaikkiin luonnossa esiintyviin valaistustilanteisiin. Valotason hitaat muutokset sekä kirkkauden tarkka arviointi on silti vaikeaa. Sopeutumistason ollessa alhainen näkökyky heikkenee, kun taas korkeammilla sopeutumistasoilla näköaisti luo tarkemman kuvan ympäristöstä. Sopeutuminen erilaisiin luminanssitasoihin ei tapahdu välittömästi. Siihen vaikuttaa miltä tasolta sopeutuminen alkaa, mihin tasoon se päättyy ja mistä verkkokalvon alueesta on kysymys.

Ihmisen siirtyessä valoisasta hämärään sopeutumista kutsutaan hämärä adaptoitumiseksi. Tähän ilmiöön liittyy kaksivaihetta, joissa ensimmäisessä vaiheessa tappisolujen herkkyys nousee nopeasti satakertaiseksi sopeutumisen alkaessa. Toisessa vaiheessa tapahtuu sauvasolujen hidas sopeutuminen, joka kestää noin 30-40 minuuttia. Tämän ajanjakson aikana herkkyys lisääntyy noin 1 000-10 000 kertaiseksi. Sauvasolujen hämäräsopeutumisen viive johtuu niiden näköpigmentin kehittymisestä. Kun silmään tulevan valonmäärä laskee tarpeeksi sauvasoluissa alkaa kehittyä näköpurppuraa eli rodopsiiniä. Sen muodostuminen purkaa elimistön A-vitamiini sekä karoteeni varastoja. Jos

henkilö kärsii A-vitamiinin puutoksesta, rodopsiinia ei kehity ja oireena on hämäräsokeus.

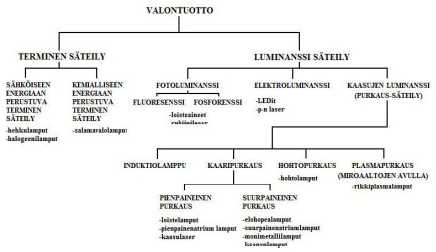
Siirryttäessä hämärästä valoisaan sopeutuminen tapahtuu hyvin nopeasti. Kyseessä on valoadaptoituminen, jossa ensimmäinen vaihe tapahtuu sekunnin kymmenesosassa. Toisessa vaiheessa fotokemiallinen rodopsiini hajoaa valon vaikutuksesta noin minuutin sisällä valoisaan siirtymisestä. Voidaan siis todeta, että hämäränäön säilyttämiseksi esimerkiksi taskulampun sytyttäminen pimeässä tuhoaa rodopsiinin, jonka uudelleen muodostuminen tarvitsee yli puoli tuntia. Pimeässä näkemiseen voidaan käyttää punaista valoa, joka ei hajota hämäränäköpigmenttiä.

Värisopeutumisessa on kyse Ihmissilmän pyrkimyksestä havainnoida ympäristöään niin, että silmään saapuvan valon yhdistelmä synnyttäisi aistimuksen valkoisesta valosta. Kun silmä sopeutuu esimerkiksi kaasupurkauslamppujen hieman sinisävyiseen valoon ja siirrytään tilasta ulos päivän valoon, voidaan huomata ympäristön näyttävän sinisävyiseltä. Värisopeutumisessa silmä tottuu vastaan ottamaan vain tiettyjä aallonpituuksia ja valaistusolosuhteiden merkittävästi muuttuessa se ei kykene tasoittamaan värivaihtelua välittömästi. (Halonen, Lehtovaara 1992)

4 VALONLÄHTEET

Valoa voidaan tuottaa lukuisilla eri menetelmillä, mutta kaikille valontuottotavoille yhteinen piirre on, että säteily on peräisin fysikaalisesta aineesta/aineista. Riippumatta onko kyse termisestä- vai luminanssisäteilijästä valontuotto perustuu loisteaineisiin. Perehdyttäessä tarkemmin valontuottotapoihin voidaan terminen säteily eli hehkusäteily määritellä lämpöliikkeen aiheuttaman värähtelyn avulla. Sen teoreettinen valotehokkuus maksimi on n. 90 lm/W, joka vastaa termiselle säteilijälle mahdottoman tuntuista 6500K:n värilämpötilaa. Luminanssisäteily sen sijaan vaatii tarkempaa määrittelyä, koska säteilyilmiö on huomattavasti monimutkaisempi. Luminanssisäteilyyn perustuvan valonlähteen teoreettista maksimia voidaan arvioida laskennallisesti luokkaan 190 lm/W näkyvän valon alueella. Kuitenkin laboratorio olosuhteissa on pystytty saavuttamaan, jopa 276 lm/W valoteho valkoisella R&D teho LED-sirulla. Amerikkalainen valaisin- ja lamppuvalmistaja Cree Inc of Durham rikkoi edeltävän ennätyksen 254 lm/W helmikuussa 2013.

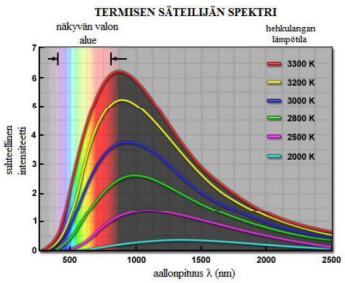
Yhteistä kaikille valaisin- ja lampputyypeille on jatkuva vaatimus kehittyä. Valontuottokykyä ja käyttöikää halutaan lisätä, kun taas valaisimen kokoa ja energiankulutusta pienentää. Lisäksi valaisimen tulee kestää mekaanista rasitusta, sen kunnossapitokustannukset on minimoitava ja hankintahinnan pysyttävä kilpailukykyisenä. Nämä raamit karsivat markkinoilta tehokkaasti teknologiaa, joissa kehitys potentiaali alkaa loppua. Kuviossa 21 on esitetty, kuinka valonlähteet voidaan luokitella niiden toimintaperiaatteen mukaisesti.



KUVIO 21. Valontuoton päälajit. (Halonen, Lehtovaara 1992)

4.1. Termiset säteilijät

Hehku- ja halogeenilamppujen tuottama terminen säteily perustuu lämpöliikesäteilyyn. Sähkövirran avulla tuotettava lämpö saa atomit, molekyylit, ionit jne. lämpöliikkeeseen kiinteässä kappaleessa tai nesteessä. Lämpötilan noustessa hehkulangassa vaaditun rajan yli (T>1000 K), valonlähde alkaa säteillä näkyvänvalon aallonpituuksia. Mitä suuremmaksi lämpötila nousee, sitä suurempi on sähkömagneettisen säteilyn intensiteetti ja sitä valkoisempaa valoa syntyy. Kuvassa 22 on esitetty, kuinka hehkulangan lämpötila vaikuttaa syntyvään säteilyyn.



KUVIO 22. Termisensäteilijän spektri. (Zeiss C. 2013)

Termisten säteilijöiden hyötysuhde on heikko, koska valontuotto perustuu suurilta osin lämpösäteilyyn, kuvassa näkyvän valon oikea puoli. Energiaa muutetaan turhaan infrapunasäteilyksi (IR-säteily), jonka aallonpituuksia ihminen ei kykene havaitsemaan. Valotehokkuus nousee, kun hehkulangan lämpötilaa nostetaan, mutta hyötysuhde laskee lampun ottaessa moninkertaista virtaa. Lisäksi lämpöhäviön osuus kasvaa merkittävästi.

Termiselle säteilijälle on ominaista jatkuva spektri kuten auringonvalolla. Sen ansioista valolla on hyvät värintoisto-ominaisuudet, mutta sävyt ovat pääasiassa lämpimänvalkoisia.

Myynnistä poistuneet hehkulamput sekä vielä käytössä olevat halogeenilamput, ovat käyttöajaltaan lyhyt ikäisiä, vain 2 000–5 000 tuntia. Nykyaikainen valaistuksen ohjaus kuormittaa hehkulankaa, jonka ansiosta käyttöikä voi laskea entisestään.
(Halonen, Lehtovaara 1992, Simpson 2003)

4.1.1 Hehkulamppu

HISTORIA

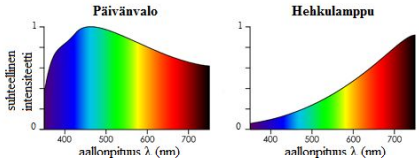
Hehkulamppu on valonlähteistä vanhin. Suomessa hehkulamppujen käyttö aloitettiin vuonna 1882, jolloin Finlaysonin tehtaalla syttyivät ensimmäiset sähköllä toimivat lamput. Airam aloitti hehkulampputuotannon vuonna 1925, jonka jälkeen hehkulamppu levisi käytetyimmäksi yleisvalonlähteeksi. EU:n alueella kotitalouksien huonevalaistukseen tarkoitettujen yli 7 W hehkulamppujen valmistus ja maahantuonti kiellettiin 1.9.2012 alkaen.

TOIMINTAPERIAATE

Valontuotto perustuu lasikuvun sisällä, hapettomassa tilassa sähkövirralla lämmitettävään hehkulankaan. Heti kun lanka saavuttaa riittävän kuumuuden se alkaa säteillä valoa. Näkyvän valon lisäksi hehkulamppu tuottaa myös runsaasti infrapunasäteilyä. Tämän aiheuttaa volframihehkulangan läpi johdettava sähkövirta. Hehkulanka halutaan tehdä mahdollisimman lyhyeksi, jotta lämpöhäviö voitaisiin minimoida. Hehkulankaa myös kierretään kierukalle kokonaispituuden lyhentämiseksi. Silti vain noin 5 % hehkulampun käyttämästä sähköstä tuottaa valoa lopun muuttuessa lämmöksi. Hehkulangan pituus riippuu ensisijaisesti käyttöjännitteestä ja paksuus sen läpi johdettavasta virrasta.

VALONTUOTTO JA VÄRIOMINAISUUDET

Hehkulampulla on lämpösäteilijälle ominainen jatkuvaspektri. Se ulottuu aina ultraviolettista-infrapunaan saakka ja toistaa voimakkaimmin keltaisen ja oranssin aallonpituuksia. Mitä korkeampi hehkulangan lämpötila saavutetaan, sitä enemmän syntyy sinisen ja valkoisen aallonpituuksia. Värilämpötilat ovat tyhjölampuilla yleisesti 2 400–2 600 K ja kaasutäyttöisillä hehkulampuilla 2 800–3 000 K. Kuviossa 23 on esitetty hehkulampulle ominainen jatkuva valon spektri.



KUVIO 23. Hehkulampun spektri (www.housecraft.ca)

Hehkulamppu himmenee ikääntyessään. Volframhehkulangan sulamispiste on alhainen noin 3600 K. Län myötä hehkulanka höyrystyy tummentaen kuvun seinämiä ja luonnollisesti myös lankaa. Langan ohentuminen laskee siinä kulkevan virran määrää joka vaikuttaa valotehoon. Lisäksi tummentumat estävät valon säteilyä ympäröivään tilaan. Käyttöikään vaikuttaa monet tekijät. Kuuma hehkulanka on altis tärinälle. Lampun sisällä kuumuuden aiheuttama volframin höyrystyminen haurastuttaa ja ohentaa hehkulankaa. Myös ylijännite rasittaa lankaa ja sen valmistuksessa syntyneitä paksuuden epätasaisuuksia. Näiden tekijoiden summana lanka palaa ennen pitkään poikki. Arvioitu 5 000–10 000 tunnin paloaika edellyttää valmistajan ohjeistaman nimellisenjännitteen käyttöä.

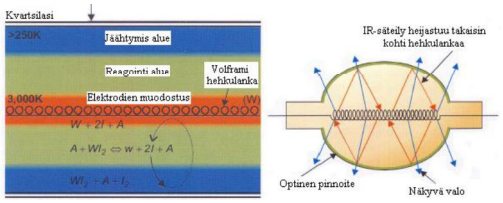
4.1.2 Halogeenilamppu

HISTORIA

Halogeenilamppu kehitettiin hehkulampun rinnalle pidentämään polttoikää ja tuottamaan lisää valotehoa. Kuten hehkulampulla, halogeenitekniikan juuret pohjautuvat kaukaa historiaan. Jo vuonna 1881 alettiin kehittää kemiallista reaktiota, joka syntyi volframin sekä halogeenin välillä. Tämä rektio saatiin vuosikymmeniä myöhemmin 1960-luvulla hyödynnettyä, kun ensimmäiset jodikiertoprosessiin perustuvat halogeenivalaisimet lanseerattiin. Lampun täytteenä tällöin toimi jodikaasu, jota seurasi erilaisten jalometallikaasujen kokeilu aina 1980-lukuun asti, jolloin halogeenilamppujen kehitys alkoi tuottaa tulosta. Lyhyellä hehkulangalla ja pienillä jännitteillä toimivat halogeenilamput olivat markkinoille tullessaan menestys. Yhä edelleen halogeenivalaisimet ovat hyvin käytettyjä matalan hankintahintansa ja monikäyttöisyytensä ansiosta, mutta tekniikka on ajansaatossa kehittynyt.

TOIMINTAPERIAATE

Halogeenilampun valontuotto perustuu hehkulampun tavoin volframihehkulankaan, jota lämmitetään johtamalla siihen sähkövirtaa. Lampun halogeenitäytekaasu reagoi volframihehkulangasta irtoavien atomien kanssa synnyttäen "palautuvan"-reaktion. Volframilanka höyrystyy vähitellen ja syntynyt höyry siirtyy kohti lampun seinämää. Hehkulangan ja kuvunseinämän välissä lämpötilan saavuttaessa sopivan tason volframi ja halogeeni muodostavat molekyylejä (volframihalodeja), jotka lämpimän kaasun liikkuessa lampun sisällä palaavat kohti hehkulankaa. Kuumuuden noustessa molekyylit hajoavat tuottaen sähkömagneettista säteilyä. Volframi atomit kiinnittyvät takaisin hehkulankaan ja halogeenikaasu jatkaa kiertoaan kuvun sisällä valmiina uuteen kierrokseen. Hehkulanka toimii normaalilla lämpötilalla noin 2 350 ja 3 150 asteen välissä, volframin sulamispisteen ollessa 3 420 astetta. Täytekaasun lämpötila vaihtelee kuvun ja hehkulangan välissä, mutta kuvun pintalämpötila voi olla yli 250 astetta. Kuviossa 24 on esitetty halogeenilampun reaktiokiertoa. (Halonen, Lehtovaara 1992)



KUVIO 24. Halogeenilampun toimintaperiaate. (Simpson 2003)

RAKENNE

Suurimmat erot halogeenilampuissa on niiden täyttökaasuissa. Yleisesti halogeenikaasu on jodia, bromia tai fluoria. Ne voivat olla myös sekoituksia muiden jalokaasujen kanssa. Yleisesti käytetään argonia tai kryptonia, kuten loistelamppujen täytekaasuissa. Suuritehoisissa lampuissa paine on noin luokkaa 1 baari ja pienemmissä paine on korkeampi, jotta valoteknisten ominaisuuksien säilyttämiseksi sekä estämään volframin höyrystymistä liiaksi. Kuvulta vaaditaan suurta lämpötilan sietokykyä. Usein kuitenkin esimerkiksi rakennustyömaa käytössä halogeeniheittimien (100 W) lamput sulavat runkoonsa likaantuessaan tai lampun haurastuttua tärinässä. Materiaaleina käytetään mm. kvartsia sekä lasia sen korkean sulamispisteen vuoksi.

Kylmän hehkulampun sytytysvirta on noin 10 kertaa korkeampi, kuin sen nimellinen virta. Sen aiheuttaa matala resistanssi, joka on syttymishetkellä kymmenesosa polttolämpötilan resistanssista. Tästä syystä sytytyshetkellä syntyvä virtapiikki lämmittää liian nopeasti hehkulankaa haurastaen sen rakennetta, joka lyhentää halogeenilampun käyttöikää. Käyttöiät pyörivät nimellisjännitteillä käytettynä noin 2 000–3 000 tunnissa, riippuen lampun tehosta. Halogeenilamput, jotka toimivan pienjännitteellä (6–24V) ovat pitkä ikäisempiä kuin verkkojännitteellä toimivat. Syy tähän voidaan selvittää tarkastelemalla hehkulangan kestoa ja sen resistanssia. Pienjännitteisen lampun hehkulilankaan on johdettava kymmenkertainen virta määrä, joka kasvattaa hehkulangan poikkipinta-alaa. Resistanssin laskiessa virtapiikkiongelma kuluttaa lankaa merkittävästi sytytysvaiheessa.

LAMPPUTYYPIT

Halogeenilamput jaetaan useaan ryhmään, joista yleisimpinä: kaksikantaiset-, yksikantaiset-, kylmäsäde- ja matalajännitteiset halogeenilamput. Kuviossa 25 on esitetty erityyppisiä halogeenilamppuja.

KUVIO 25. Yleisimmät halogeenilamput (Simpson 2003)

VALONTUOTTO

Volfrmin säteilemä valovirta on sitä suurempi mitä kuumempana se säteilee. Lampun energia tehokkuus sekä käyttöikä laskevat korkeilla käyttöjännitteillä. Teoreettisesti voidaan osoittaa volframin maksimi valotehokkuuden olevan lähellä sen sulamispistettä 3 380 asteessa, jolloin saadaan valotehokkuudeksi 53 lm/W. Tämä asettaa rajan halogeenilamppujen kehitykselle. Todellisuudessa tätä raja-arvoa on käytännössä mahdoton saavuttaa, sillä mm. halogeenitäytekaasussa tapahtuu lämpöhäviöitä ja hehkulanka siirtää osan lämmöstä kiinnitys pisteeseen. Taulukossa 6 on esitetty halogeenilamppujen valotehokkuuksia. Koska toiminta perustuu lämpösäteilyyn, on helogeenilampun energiatehokkuus huono. Sen ottamasta sähköisestä tehosta voidaan sanoa muuttuvan läm-

möksi noin 80 %, kun 7 % muuttuu valoksi hyötysuhteen ollessa alle 10 %. Energiatehokkuus on kuitenkin noin 30 % parempi, kuin hehkulampuilla.

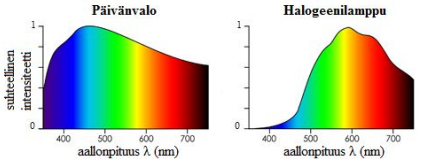
TAULUKKO 6. Halogeenilamppujen ominaisuudet. (Simpson 2003)

Rakenne	Teho (W)	Valovirta (lm)	Käyttöikä (h)	Valotehokkuus (lm/W)
Perinteinen	85	930	2000	10,9
Volfram halogeeni	75	1030	2500	13,8
IR-halogeeni	60	1110	3000	18,5

Vaikka volframihehkulanka toimii hyvin korkeassa lämpötilassa, halogeenilamppujen tuottaman valovirransuhde hehkulangan pinta-alayksikkö kohden on parempi kuin hehkulampulla.

VÄRIOMINAISUUDET

Halogeenilamppu synnyttää jatkuvan spektrin, joka säteilee valoa 300–2 000 nm välillä. Kuviossa 26 on esitetty halogeenilampulle ominainen jatkuva valon spektri.



KUVIO 26. Halogeenilampun spektri (www.housecraft.ca)

Kuten hehkulampuissa, halogeenilamput tuottavat runsaasti UV-säteilyä, mutta ei ihmiselle haitallisia määriä. Ilmiö johtuu hehkulangan korkeasta lämpötilasta ja kuvun materiaalista (yleensä kvartsi). Näkyvän valon alueella sen spektri on voimakkain 400–700 nm välillä riippuen hehkulangan lämpötilasta. Tyypillisesti värilämpötila on 2 700–3 000 K välissä. Suurempi hehkulangan lämpötila nostaa värilämpötilaa ja parantaa hyötysuhdetta, mutta ylijännite lyhentää käyttöikää.

LIITÄNTÄLAITTEET

Pienjännitehalogeenit tarvitsevat erillisen virtamuuntajan, joka tavallisesti on elektroninen virtalähde. Ne toimivat usein ilman tyristori säädintä ja niitä on laaja valikoima eri valmistajilta. Himmennys ja ohjaus onnistuvat laajalla alueella ja lamppu syttyy nopeasti. Tyypillisesti pienjännitehalogeenin virrankytkeytymisen yhteydessä syntyy voimakas virtapiikki. Sen arvo on hetkellisesti korkea, mutta laskee lampun hehkulangan lämmetessä normaalille tasolle. Säädin on valittava siten, että se kestää sytytysvirran. Kuviossa 27 on esitetty halogeenilamppujen liitäntälaitteita. Tehohäviöitä ei ole laajan liitäntälaite valikoiman vuoksi määritetty.

230V-halogeenilamput			W
P_{lok} [W]	I_N [A]	I_s [A]	
40	40	0,18	
50	50	0,21	
75	75	0,33	
100	100	0,44	
150	150	0,66	
250	250	1,09	

12V-halogeenilamput (EL)				W
P_{lok} [W]	P_{lok} [W]		I_N [A]	
20*	21	1	0,10	
35*	37	2	0,17	
50*	53	3	0,23	
65*	69	4	0,30	

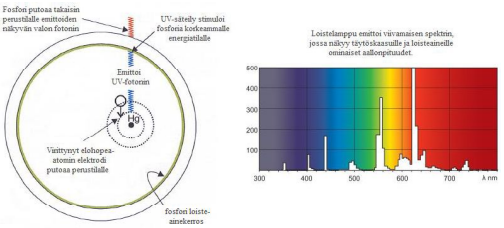
* *valaisinkoht. EL70 VA muuntaja*

KUVIO 27. Halogeenilampun liitäntälaitteet (Indoor lighting solutions, Fagerhult Oy 2012-2013)

Halogeenilamppujen myynti tullaan lopettamaan EU-alueella vuoden 2016 loppuun mennessä. EuP (Energy Using Products)-direktiivin myötä hyötysuhteeltaan heikoimpia valonlähteitä poistetaan vähitellen markkinoilta. Direktiivin vaiheita on esitelty tarkemmin luvussa 6.4 EuP-direktiivi.

4.2. Luminesenssisäteilijät

Luminesenssisäteilijät, kuten kaasupurkauslamput ja LED, tuottavat vahvasti viivamaisen spektrin. Tähän vaikuttaa eri loisteaineiden ja kaasujen käyttö. Purkauslamputissa, elektrodeja viritetään sähkövirralla, jolloin niistä irtoaa elektroneja. Elektronien reagoidessa täytös- ja loisteaineiden atomien elektrodien kanssa ne hyppäävät elektronikuoressa yhden tai useamman tason ulommas. Tämä tarkoittaa, että niiden tuottama sähkömagneettinen säteily koostuu ryhmästä korkea intensiteettisiä aallonpituuksia. Osa aallonpituuksista puolestaan säteilee huonosti tai ne puuttuvat kokonaan. Kuviossa 28 on esitetty, kuinka säteily muodostuu loistelampussa.



KUVIO 28. Loistelampun viivaspektrin muodostuminen. (Simpson 2003)

Luminesenssi säteilijöiden hyötysuhde on merkittävästi korkeampi kuin termisten. Sen lisäksi valonlähteiden mm. ohjattavuus, käyttöikä, valotehokkuus ja matala energiankulutus luovat mahdollisuuksia taloudellisille valaistusratkaisuille.

4.2.1 Elohopeahöyrylamppu

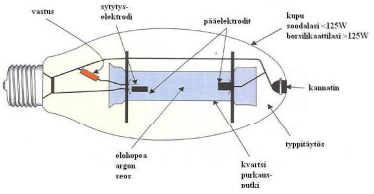
HISTORIA

Elohopeapurkaukseen perustuvia lamppuja alettiin kehittää jo 1900-luvun alkupuolella. Ensimmäiset korkeapaineiset elohopealamput koostuivat tyhjöpumpatusta lasiputkesta, jonka molemmissa päissä oli syvennykset täynnä nestemäistä elohopeaa. Sähkövirralla tuotetun lämmön vaikutuksesta elohopea höyrystyi ja toimi elektrodina reaktiossa. Syttyminen saatiin aikaan johtamalla putkeen tasavirtaa sarjavastuksen kautta. Lamppua heilauttamalla elohopea syttyi ja laskemalla takaisin vaakatasoon reaktio jatkui tuottaen valoa. Yhä nykyään elohopealamppuja pidetään tekniikaltaan yksinkertaisimpina purkauslamppuina, joiden toimintavarmuus ja hankintahinta ovat hyvässä suhteessa.

TOIMINTAPERIAATE

Elohopealampun toiminta perustuu elohopeaan, joka höyrystetään purkausputken sisällä kovassa paineessa ja lämmössä. Reaktiossa syntyy sähkömagneettista säteilyä, josta suurin osa on UV-alueella. Purkausputkea ympäröi suojakupu, jonka sisäpinnassa on loisteainekerros. Loisteaineena käytetään mm. yttriumvanadaattia. Syntyvä UV-säteily

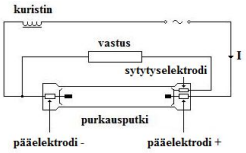
aktivoi loisteaineen, joka säteilee ympärilleen näkyvää valoa. Ulkokupu suodattaa suurenosan haitallisesta UV-säteilystä. Täytöskaasuna käytetään elohopeaa ja pientä määrää toista jalokaasua esimerkiksi argonia helpottamaan syttymistä ja johtamaan lämpöä. Tästä apukaasusta käytetään nimitystä inertiakaasu. Apukaasun koostumus ja paine määrittää lampun syttymisjännitteen sekä auttaa lamppua säilyttämään valovirran käyttöiän aikana. Purkausputken ja ulkokuvun välissä on pienipaineinen typpikaasu tai typpi-argon-seos. Se toimii lämmön eristeenä ympäristön olosuhteille ja stabiloi purkausputken lämpötilan. Ulkokupu valmistetaan usein borosilikaatti- tai soodalasista. Kuviossa 29 on esitetty elliptisen elohopealampun rakenne.



KUVIO 29. Elohopealampun rakenne. (Simpson 2003)

RAKENNE

Purkausputken läpimittaa kasvattamalla voidaan lisätä valokaaren pituutta, joka lisää valotehoa. Valotehokkuus kasvaa kuormituksen kasvaessa valokaaren pituusyksikköä W/cm kohden. Purkausputket ovat tyypillisesti pituudeltaan 30–100 mm ja läpimitta 10–20 mm. Suuremmissa purkausputkissa lämpöhäviön osuus kasvaa, mutta suurempi elektrodiväli hidastaa valovirran alenemaa. Kuviossa 30 on esitetty elohopealampun kytkentä sähköverkkoon.



KUVIO 30. Elohopealampun kytkentä. (Halonen, Lehtovaara 1992)

Kuviossa 30 on esitetty elohopeavalaisimen kytkentä sähköverkkoon. Jännitteen kytkeytyessä, elektrodin ja apuelektrodin välille syntyy hohtopurkaus (sytytyspurkaus). Vastuksen tehtävänä on rajoittaa sytytyspurkauksen virran arvoa. Tästä syystä elohopealamppu ei tarvitse erillistä sytytin laitetta, kuten monimetalli- ja natriumlamput. Hohtopurkaus laajenee pääelektrodien välille ja lämpötilan noustessa niiden emissio kasvaa kunnes hohtopurkaus muuttuu kaasupurkaukseksi. Inertiakaasu (lisäaine täytöskaasussa) tuottaa lämpöä, joka höyrystää elohopeaa samalla nostanen painetta purkausputkessa. Tämä lämpenemisvaihe kestää useita minuutteja, jonka vuoksi elohopealamppu ei saavuta stabiilia värilämpötilaansa välittömästi, vaan muuttuu elohopean höyrystymisen suhteessa. Sabiilissa tilassa kaikki purkausputkessa oleva elohopea on höyrystyneenä.

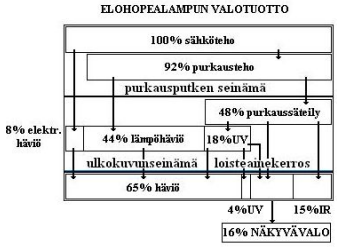
Elohopealampun jälleensyttymisaika on 2-5 minuuttia. Sen aiheuttaa kuuman purkausputken täytöskaasun korkea paine. Paineen on laskettava ja elohopean tiivistyttävä ennen uudelleen syttymistä.

LAMPPU TYYPIT

Elohopelamppujen tehoskaala kattaa 30-2 000 wattia. Käytetyimpiä ovat 80 W-400 W elliptiset lamput. Muita tyyppejä ovat muodoltaan pyöreät ”globe”-lamput ja suunnatut ”reflector”-spottilamput. Lampputyypit ovat yleisesti kierrekantaisia. EuP-direktiivin myötä lamppujen elohopeapitoisuuksia rajoitetaan ja elohopealamput poistuvat markkinoilta vuoteen 2015 alkaen.

VALONTUOTTO

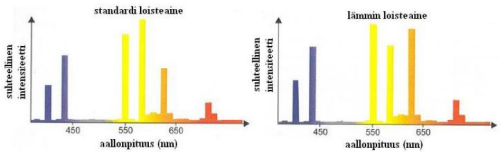
Saatava valoteho 30–60 lm/W on kaasupurkauslampuksi alhainen ja lämpöhäviön osuus ottotehosta on noin 70 %, kuten kuviossa 31 on esitetty. Tyypillisesti elohopealamppujen hyötysuhde on alle 20 %. Lamppujen polttoikä määräytyy valovirran aleneman perusteella, mutta vaihtelee 15 000–24 000 tunnin välillä riippuen mm. siihen kohdistuneesta mekaanisesta rasituksesta ja Päälle/Pois kytkentöjen määrästä ja tiheydestä. Lampun asento (pysty/vaaka) on yksi valovirran alenemaan vaikuttava tekijä. Pystyasennossa voidaan esittää valovirran säilyvän pidempään kuin vaakasuorassa käytettäessä. Alenemaan vaikuttavat lisäksi purkausputken tummuminen, koska katodimateriaalia höyrystyy hitaasti lampun palaessa ja kiinni putken seinämiin. Myös loisteaine menettää säteilyvoimakkuuttaan sekä lampun purkausteho heikkenee.



KUVIO 31. Elohopealampun valontuotto. (Halonen, Lehtovaara 1992)

VÄRIOMINAISUUDET

Elohopealampun tuottama valo on sinertävää, koska valo koostuu aallonpituuksista 405, 546, 577 ja 579 nm ja noin viidennes säteilytehosta on UV-alueella. Koska elohopea säteilee heikosti tai ei ollenkaan punaisen aallonpituuksia, värintoisto-ominaisuudet jäävät heikoiksi. R_a-luku on yleensä noin 40 ja spektrikorjatuilla loisteaineseoksilla R_a on noin 60. Värilämpötilat sijoittuvat noin 3 800-5 000 kelvinin väliin riippuen täytöksen elohopea määrästä sekä täytekaasujen ja loisteaineen ominaisuuksista. Kuviossa 32 on esitetty, kuinka loisteaine vaikuttaa spektrin muotoon.



KUVIO 32. Loisteaineen vaikutus elohopealampun spektriin. (Simpson 2003)

LIITÄNTÄLAITTEET

Elohopealamppu on ohjattavissa konventionaalisen kuristimen tai säädettävän virtalähteen avulla. Elektronisia liitäntälaitteita on olemassa, mutta elohopealampuille valitaan liitäntälaitteeksi useimmiten elektromagneettinen kuristin. Tähän on syynä elohopealampun heikko säädettävyys ja elektronisilla liitäntälailla saatava olematon hyöty.

Elohopealampun himmennys alue on noin 5–100 %, mutta himmennys on tehtävä hitaasti, jotta lamppu ei sammu. Valmistajat eivät suosittele himmennystä, koska jännitteen modulointi kuormittaa kuluvia osia. Kuviossa 33 on esitetty valaistussuunnittelussa käytettäviä ohjearvoja magneettikuristimen tehohäviöille.

Elohopealamput (kuristin)				W
P_{kok} [W]	$P_{hävio}$ [W]	I_N [A]	I_s [A]	
50	61	11	0,29	0,38
80	92	12	0,44	0,74
125	139	14	0,68	1,18
250	272	22	1,32	2,34

Symbolien selitys

P_{kok} = lampun ja liitäntälaitteen yhteenlaskettu teho [W]

$P_{hävio}$ = liitäntälaitteen tehohäviö [W]

I_N = lampun palamisvirta [A]

I_s = lampun hetkellinen virta syttymisvaiheessa [A]

KUVIO 33. Liitäntälaitteiden ominaisuudet. (Indoor lighting solutions, Fagerhult Oy 2012-2013)

KÄYTTÖ

Elohopealamppuja käytetään usein ulkovalaistuksessa esimerkiksi tunnelien valaisemiseen. Ympäröivät olosuhteet kuten lämpötilavaihtelu ei muuta merkittävästi lampun valo-ominaisuuksia. Sisävalaistuksessa käyttökohteita ovat mm. teollisuushallit ja varastohallit, joissa sijoituskorkeus on 3–10m, urheiluhalleissa sekä myymälätiloissa käytetään spektrikorjattuja lamppuja, paremman värintoiston saavuttamiseksi. Taulukossa 7 on esitetty elohopealampun vahvuuksia ja heikkouksia.

TAULUKKO 7. Elohopealampun ominaisuudet

VAHVUUDET	HEIKKOUDET
• edullinen hankintahinta • ei tarvitse erillistä sytytintä • lämpötilan olematon vaikutus valo-ominaisuuksiin	• Syttymisaika 3-5 min • suuri elohopean määrä • lampun korkea pintalämpötila • hidas säädettävyys • heikko valovirran pysyvyys • heikot värintoisto-ominaisuudet • pitkä jälleensyttymisaika • lamppujen kuolleisuus • heikko tärinän kesto • hidas jälleensytytys

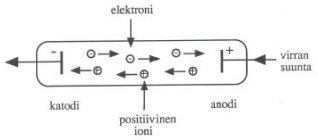
4.2.2 Monimetallilamppu

HISTORIA

Ensimmäiset monimetallilamput näkivät päivänvalon 1960-luvulla, kun elohopealampun rinnalle alettiin kehitellä värintoisto-ominaisuuksiltaan edistyneempää valonlähdettä. Tuotekehityksessä keskityttiin tutkimaan täytehöyryn ominaisuuksia ja todettiin, että lisäämällä mm. talliumin, natriumin ja indiumin jodiyhdisteitä elohopean sekaan voitiin vaikuttaa purkausputkessa syntyvän säteilyn ominaisuuksiin.

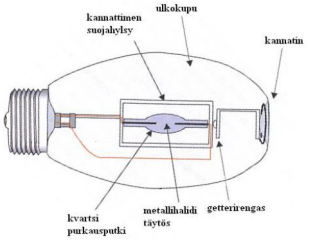
TOIMINTAPERIAATE

Toiminnaltaan monimetallilamppu muistuttaa elohopeahöyrylamppua. Kaasupurkaus tapahtuu elohopeahöyryssä, johon on lisätty eri metallien halogeeniyhdisteitä. Lähtötilanteessa halogeeniyhdisteet ovat kiinteässä muodossa ja elohopea tiivistyneenä purkausputken seinämällä. Sytytin synnyttää elektrodien välille niin suuren sähkökentän, että lopulta läpilyönti sytyttää purkausputken sytytyskaasun. Tyypillisesti sytytyskaasuna käytetään argonia tai neonia. Aluksi syntyvä säteily on peräisin sytytyskaasussa tapahtuvasta purkauksesta. Lämpötilan noustessa, metallihalogeenit ja elohopea alkavat höyrystyä, joka on nähtävissä valonvärilämpötilan muutoksena ja valotehokkuuden nousuna. Puskurikaasuna toimivan elohopean höyrystyminen nostaa purkauksen lämpötilaa, joka kiihdyttää halogeeniyhdisteiden höyrystymistä. Lämpeneminen kestää normaalisti 4–6 minuuttia ennen kuin valaisin saavuttaa lopullisen värilämpötilansa. Lampun palaessa, kaikki elohopea on höyrystyneenä purkausputkeen, mutta täyteaineet eivät höyrysty täysin, vaan pysyvät osittain tiivistyneenä putken viileimmässä pisteessä sen seinämillä. Tätä aluetta kutsutaan kylmäpisteeksi. Kun metallihalogeenit alkavat höyrystyä, ne kulkeutuvat purkauksen kuumaan ytimeen, jota kutsutaan purkauskanavaksi ja hajoavat halogeeni- ja metalliatomeiksi. Kuviossa 34 on esitetty, kuinka elektrodit virittävät täytöskaasua.



KUVIO 34. Purkauskierron periaate (Halonen, Lehtovaara 1992)

Elektrodista irronneet elektronit virittävät atomeja, kunnes ne purkautuvat synnyttäen kullekin metallille yksilöllistä sähkömagneettista säteilyä. Tämä näkyy lämpenemisen aikana valonvärilämpötilan muutoksena ja valotehokkuuden nousuna. Eri metallien synnyttämän säteilyn aallonpituudet voidaan tunnistaa valon spektristä, missä ne näkyvät korkeina pylväinä. Halogeenien spektrikomponentteja ei kuitenkaan voida havaita sillä niiden viritystilan energiat ovat suuria ja säteily siten ulkona näkyvänvalon spektristä. Purkauksen jälkeen halogeeni- ja metalliatomit kulkeutuvat sähkökentän vaikutuksesta pois purkauskanavasta, alhaisemman lämpötilan alueelle. Metalliatomit yhdistyvät taas halogeenien kanssa purkausputken seinämän tuntumassa ja ovat näin valmiita aloittamaan kierron alusta. Kuviossa 35 on esitetty elliptisen monimetallilampun rakenne.



KUVIO 35. Monimetallilampun rakenne. (Simpson 2003)

RAKENNE

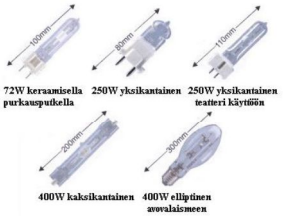
Kylmänpisteen lämpötila määrää purkausputken höyrynpaineen ja näin antaa lampulle sen valotekniset ominaisuudet. Lampun käyttöasennolla on suora yhteys kylmäpisteen sijaintiin, lämpötilaan ja siten lampun valontuottoon. Tästä syystä monet valmistajat ilmoittavat lampuilleen sopivat käyttöasennot. Suunnittelussa voidaan huomioida lämpötilan jakautuminen tasaisesti ympäri purkausputkea sen muotoilun avulla. Lisäksi sijoittamalla purkausputken päihin lämpöä heijastavat zirkoniumoksidi kerrokset, voidaan täytösaineen tiivistyminen estää elektrodien läheisyydessä ja siirtää kylmäpiste haluttuun paikkaan.

Monimetalivalaisimen purkausputkimateriaalina käytetään kvartsilasisia sekä keraamisia purkausputkia. Keraamiset putket mahdollistavat pienitehoisten lamppujen (20–70 W) korkeamman käyttölämpötilan, parantavat valotehoa ja värintoisto-ominaisuuksia.

Elektrodimateriaalina käytetään pääasiassa volframikappaletta, jonka ympärille on kiedottu volframilankaa. Niiden välissä oleva emissioaine alentaa elektrodien energiaa ja helpottaa elektronien irtoamista lampun palaessa. Purkausputken täytösaineena käytetään tyypillisesti elohopeaa sekä eri metallien halogeeniyhdisteitä ja pieniä määriä jalokaasua sytytyskaasuna. Paine purkausputkessa on elohopealamppua korkeampi välillä 1 000–1 500 kPa. Purkausputken ja ulkokuvunvälissä on kaasutäytös (typpi), jota ylläpidetään kaasuja absorboivan getterin avulla. Täytös voi olla myös tyhjö, josta getteri puhdistaa epäpuhtaudet. Se toimii suojana ja lämmön eristeenä purkausputkelle. Kannattimet muodostavat purkausputkelle tukikehikon. Ne on kiinnitetty purkausputken sisäänvientijohtimiin ja ulkokuvun huippuun, pitämään purkausputki vakaana suojaten sitä tärinältä ja iskuilta.

LAMPPU TYYPIT

Monimetalivalaisimet jaotellaan purkausputki materiaalien perusteella kahteen ryhmään: kvartsilasisiin FS (Fused Silica) ja keraamisiin CDM (Ceramic Discharge Metal halide). Käytetyimpiä lampputyyppejä ovat yksi- ja kaksikantaiset sekä kierrekantaiset monimetallilamput, joita on esitetty kuviossa 36. Niiden valikoima kattaa tehot 35W-20kW.

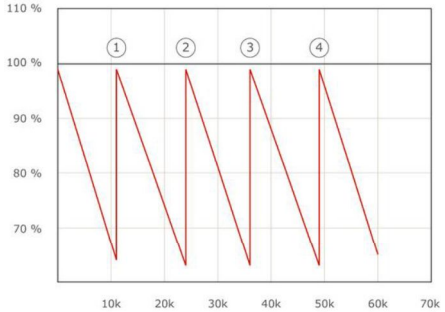


KUVIO 36. . Monimetallilamppu tyypit. (Simpson 2003)

EuP-direktiivi linjasi toisen vaiheen voimaantulon myötä 2012 uusia rajoituksia kaasupurkausvalaisimille. Pienitehoisimpia E27, E40 ja PGZ12-kantaisia monimetalli- ja suurpainenatriumlamppuja on alettu vähitellen poistaa markkinoilta. Kolmannessa vaiheessa vuonna 2017, alle 400 wattiset E27, E40 ja PGZ12-kantaiset lamput poistetaan markkinoilta.

VALONTUOTTO

Elohopealamppuun verrattuna monimetallilampun valotehokkuus on korkeampi. Siihen vaikuttavat metalliyhdisteiden lisäksi lampun rakenne ja teho. Valotehokkuus on 75–125 lm/W. Valovirran alenemaa aiheuttaa kaasupurkauslampuille tyypilliset tekijät, elektrodimateriaalin höyrystyminen, purkausputken tummuminen sekä metalliyhdisteiden kemiallisen tasapainon muutos sekä lamppuun kohdistunut tärinä ja iskut. Verkkojännitteen vaihtelu aiheuttaa lampun läpi kulkevan virran muutoksia, joka näkyy helposti valotehon ja väriominaisuuksien muutoksena. Lamppuvirran kasvaessa elektrodien höyrystyminen kiihtyy. Valmistajat ilmoittavat usein verkkojännitteen muutoksen rajaarvoksi ±5 % nimellisjännitteestä. Tällä on myös toinen syy sillä verkkojännitteen akillinen 5-10 % pudotus sammuttaa lampun. Monimetallilampussa paloaika on lyhyempi, kuin elohopealampussa. Lyhyt käyttöikä on noin 6 000–2 0000 tuntia ja LLMF 0,66 kuten kuviossa 37 on esitetty.

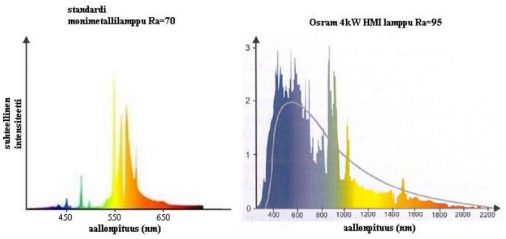


KUVIO 37. Monimetallilampun vaihtoväli 50000tunnin käyttöaikana (www.glamox.fi)

VÄRIOMINAISUUDET

Värilämpötilat vaihtelevat normaalisti 3600–4200 kelvinin välillä, koska spektri koostuu 550–600 nm aallonpituuksista. Se vastaa puhtaamman valkoista valoa, jonka värintoistokyky on välillä Ra-65–75. Värinlämpötilaan ja spektrin komponentteihin voidaan, kuitenkin vaikuttaa eri täyteaine seoksilla ja suhteilla, jotta spektristä saadaan halutunlainen. Lisäämällä kolmea eri halogeeniyhdistettä, spektristä muodostuu vahvasti viivamainen ja siihen syntyy kolme säteilyhuippua. Esimerkiksi natriumin avulla voidaan

korostaa keltaisen ja oranssin aallonpituuksia (589nm), talliumilla vihreää (535nm) ja indiumilla sinistä (400–450nm). Lisäksi muuttamalla natrium- ja indiumjodien osapainetta voidaan värilämpötilaa säätää laajalla alueella. Tämä mahdollistaa myös kylmät noin 7000 kelvinin värilämpötilat. Värintoisto-ominaisuuksien parantamisessa käytetään maametallijodeja esimerkiksi disprosiumia. Sen säteilyn spektri on lähes jatkuva näkyvän valon alueella, jolloin spektristä puutuvat aallonpituudet alkavat säteillä ja värintoisto parantuu. Disprosiumlampuille ominainen värilämpötila on 4000–6000 kelviniä ja Ra jopa 85–95 kuten kuviossa 38 on esitetty.



KUVIO 38. Spektrin koostumus erilaisilla loisteaineilla. (Simpson 2003)

Syntyvän UV-säteilyn määrä on riippuvainen purkausputkessa käytettävistä metalliyhdisteistä. Kvartsilasi ei suodata UV-säteitä vaan läpäisee haitallisen säteilyn ympäristöön. Suojalasittomiin valaisimiin tarkoitetut lamput voidaan päällystää erilaisilla säteilyä suodattavilla pinnoitteilla tai tehdä ulkokupu useasta eri kerroksesta käyttäen kirkkaita, UV-säteilyä suodattavia materiaaleja esimerkiksi UV-suodattavaa kvartsia. Valmistajat ilmoittavat tuoteselosteessa, onko lamppu mahdollista asentaa suojalasittomaan valaisimeen. Valaisimien suojalasit on kehitetty suodattamaan haitallinen UV-säteily sekä suojaamaan ympäristöä vikatilanteessa. Korkean paineen ja lämmön vuoksi lampussa on myös vuoto- ja räjähdysvaara. Suojalasi estää kuuma höyryä pääsemästä rungon sisältä ympäristöön, purkausputken ja ulkokuvun rikkoutuessa. Valmistajien on noudatettava IEC 61167-standardin mukaisia UV-säteilyn maksimiarvoja.

LIITÄNTÄLAITTEET

Kytkentä verkkoon on vastaava, kuin elohopealampulla, mutta monimetallilamppu tarvitsee toimiakseen erillisen sytyttimen. Lamppua on mahdollista himmentää elektronisilla liitäntälaitteilla sekä säädettävillä virtalähteillä. Syöttöjännitteen, lisäkuristuksen tai vaihekulman säädön avulla valotehoa voidaan säätää 50–100 % välillä. Ne eivät sovellu kuitenkaan nopeaan säätöön, vaan vaarana esimerkiksi jännitteen moduloinnissa on lampun sammuminen. Kun valaisin sammutetaan, viive uudelleen syttymisessä on hyvin pitkä, jonka aikana säätöä ei voida suositella. Säätö muuttaa täytösaineiden painetta purkausputkessa, joka vaikuttaa myös väriominaisuuksiin, koska seos-suhteet muuttuvat. Valmistajat eivät suosittele säätöä, koska jännitteen muutokset kuormittavat kuluvia osia, joka taas vaikuttaa valovirran alenemaan heikentävästi. Elektronisista liitäntälaitteista on saatavana nopean jälleen sytytyksen mahdollistavia malleja, jotka sytyttävät vielä kuuman purkausputken 30–50 kV:n sytytyspiikeillä. Elektroninen liitäntälaite on kuitenkin monimetallilampulle olennainen sisätiloissa, jossa halutaan säilyttää valonväriominaisuudet pidempään. Kuviossa 39 on esitetty tehohäviöitä erilaisille liitäntälaitteille.

Monimetallilamput (EL)

W	P_{kok} [W]	P_{havio} [W]	I_N [A]
20	25	3	0,21
35	45	6	0,20
70	80	8	0,36
150	162	15	0,70

Monimetallilamput (kuristin)

W	P_{kok} [W]	P_{havio} [W]	I_N [A]	I_s [A]
35	44	9	0,22	0,28
70	85	15	0,41	0,47
100	114	14	0,55	0,75
150	168	18	0,82	1,11

Symbolien selitys

P_{kok} = lampun ja liitäntälaitteen yhteenlaskettu teho [W]
P_{havio} = liitäntälaitteen tehohäviö [W]
I_N = lampun palamisvirta [A]
I_s = lampun hetkellinen virta syttymisvaiheessa [A]

KUVIO 39. Liitäntälaitteiden ominaisuudet. (Indoor lighting solutions, Fagerhult Oy 2012-2013)

KÄYTTÖ

Monimetallivalaisimet soveltuvat niin sisä- kuin ulkokäyttöön. Niitä käytetään urheilukenttien valaistuksessa sekä suurien hallien ja varastojen katoissa. Myös aluevalaistus esimerkiksi rakennustyömailla voidaan toteuttaa monimetallivalaisimilla. Lamppua ympäröivän tilan lämpötila ei vaikuta oleellisesti monimetallilampun valontuottoon. Elektronisen sytyttimen toiminta voi estyä kuumassa, kun sen puolijohdemateriaalien lämpötila nousee yli 80 asteen. Taulukossa 8 on esitetty monimetallilampun hyviä ja huonoja puolia.

TAULUKKO 8. Monimetallilampun ominaisuudet.

VAHVUUDET	HEIKKOUDET
• edullinen hankintahinta • lämpötilan olematon vaikutus valo-ominaisuuksiin • saatavana elohopea vapaina • korkeampi valotehokkuus ja paremmat värintoisto-ominaisuudet, kuin elohopea lampulla	• lampput arvokkaita • Syttymisaika 3-5 min • lyhyt käyttöikä • korkea pintalämpötila • hidas säädettävyys • nopea valovirran alenema • pitkä jälleen syttymisaika • lamppujen kuolleisuus • huono tärinän kesto • paljon korkeampi syttymisjännite, kuin elohopealampulla

4.2.3 Pienpaineatriumlamput

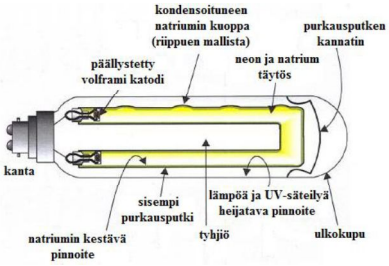
NATRIUMLAMPPUJEN HISTORIA

Jo 1920-luvulla alettiin tutkia natriumhöyryssä tapahtuvin kaasupurkauksien hyödyntämistä valaistustarkoituksessa. Aikaisemmin käynnistynyt pien- ja suurpaine elohopealamppujen kehitys, johti erilaisten täytöskaasujen testaamiseen. Ensimmäiset pienpainenatriumlamput tulivat markkinoille jo 1930 luvulla. Tällöin oli jo tiedossa, että natriumhöyryn painetta nostamalla voitiin parantaa lampun värintoisto-ominaisuuksia. Ongelmana olivat kuitenkin alkeelliset lasimateriaalit, joiden lujuusominaisuudet eivät soveltuneet korkeapaineisen ja kuuman purkausputken toteutukseen. Lisäksi elektrodien läpivientien tiivistys oli hankalaa. Ratkaisu ongelmiin saatiin 1960-luvulla, kun ensimmäiset suurpainenatriumlamput kestivät testauksen. Jo silloin 400 wattinen uutuus tuotti valotehon 100 lm/W.

TOIMINTAPERIAATE

Pienpaine-elohopealamppu ja pienpainenatriumlamppu LPS (Low Pressure Sodium) ovat toimintaperiaatteeltaan ja kaasupurkaukseltaan hyvin samankaltaisia. Purkausputkessa metallihöyryn ja jalokaasunseos on alhaisessa paineessa. Erona elohopeaan, natriumilla on korkeampi sulamispiste, mistä johtuen purkausputken lämpötilakin on korkeampi noin 260 astetta. Lämpöhäviöiden estämiseksi natrium purkausputki eristetään

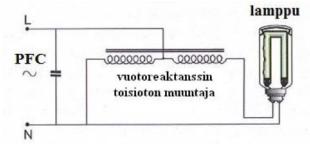
erillisen tyhjöputken sisään. Natriumhöyryn sekaan lisätään pieniä määriä jalokaasua esimerkiksi neonia, jonka tehtävä on käynnistää kaasupurkaus ja optimoida siinä tapahtuvaa rektiokiertoa. Kierrossa volframielektrodeista irronneiden elektronien törmäykset virittävät ja ionisoivat natriumatomeja. Syntyneet natriumionit liikkuvat säteittäisen sähkökentän vaikutuksesta purkausputken seinämille. Lämpötilan laskiessa seinämän tuntumassa, ne yhtyvät uudelleen, jonka jälkeen neutraalit atomit palaavat purkaukseen. Reaktiossa syntyvä resonanssisäteily virittää myös natriumatomeja. Ne säteilevät ja absorboituvat useita kertoja kaasupurkauksen ytimessä, ennen kuin kulkeutuvat purkausputken seinämille. Tätä kutsutaan säteilyn loukkuuntumiseksi ja se tuottaa suuren osan näkyvästä valosta. Kuviossa 40 on esitetty LPS-lampun tärkeimmät osat.



KUVIO 40. Pienpainenatriumlampun rakenne. (Simpson 2003)

RAKENNE

Useasta lasikerroksesta valmistetun purkausputken sisäpuoli päällystetään natriumin-kestävällä pinnoitteella. Lamppuvirran pitämiseksi pienenä, purkausputken jännitehäviön tulee olla suuri. Purkausputken pituus määräytyy halutun jännitehäviön aikaansaamiseksi. Pitkä purkausputki taivutetaan U-muotoon, jotta lampun kokonaispituus pysyy kohtuullisena. Natriumhöyrynpaine on lampun palaessa noin 0,7-1 Pa ja täytöskaasun (neonkaasu + pieni määrä argonia) noin 0,4-2 kPa. Jotta lampulle saadaan maksimaalinen valontuotto, on purkausputken seinämän lämpötila stabiloitava 260 asteeseen. Ulkokuvun tehtävä on ylläpitää tätä lämpötilaa, joka on kaasupurkauksen säteilymaksimi, heijastamalla lämpösäteily takaisin kaasupurkaukseen. Sen sisäpinta on päällystetty indium-tinaoksidi kerroksella, joka toimii peilinä infrapuna-säteilylle, mutta läpäisee resonanssisäteilyn. Kuviossa 41 on esitetty LPS-lampun kytkentä sähköverkkoon.

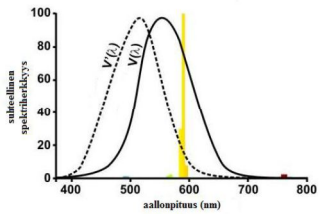


KUVIO 41. Pienpainenatriumlampun kytkentä. (Simpson 2003)

Kaasupurkaus vaatii syttyessään noin 400-500V jännitteen, johon vaikuttaa jalokaasu ja sen paine. Korkean syttymisjännitteen vuoksi kuristin on yhdistelmä. Muutamia minuutteja syttymisestä, purkausputken lämpötila, natriumhöyryn paine ja jännitehäviö kasvaa. Samaan aikaa natriumionien määrä myös lisääntyy, kunnes niitä on riittävästi purkauksen ylläpitämiseen, jolloin jännitehäviö laskee. Lämpeneminen kestää noin 10 minuuttia. Liitäntälaite valvoo ja kontrolloi tätä jännitehäviön osuutta.

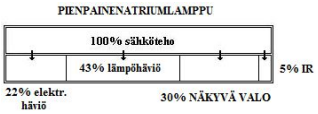
VÄRIOMINAISUUDET JA VALONTUOTTO

Noin 85 % pienpainenatriumlampun säteilystä koostuu natriumin resonanssiviivoista, joiden aallonpituudet ovat lähellä silmän spektriherkkyyskäyrän V(λ) maksimia 555nm. Ne ovat niin sanottuja D-viivoja, jotka säteilevät 589 nm ja 589,6 nm aallonpituuksilla. Paineen vaikutus valontuottoon on merkittävä. Kun paine nousee, D-viivojen itseabsorbtio kasvaa ja valontuotto laskee. Itseabsorbtiossa on kyse ilmiöstä, jossa samassa lämpötilassa olevat atomit absorboivat toistensa säteilyä. D-viivojen monokromaattinen säteily on väriltään keltaista 1900-2700K ja toistaa hyvin huonosti ympäristön värejä Ra:n ollessa alle 5. Kuviossa 42 on esitetty LPS-lampulle ominaista spektriä.



KUVIO 42. Pienpainenatriumlampun spektri. (www.lamptech.co.uk)

Syntynyt säteily on valotehokkuudeltaan voimakkain kaikista valonlähteistä. Pienpainenatriumlamppujen tehoalue kattaa 18–180 wattia, valotehokkuuden ollessa 150–200 lm/W. Hyötysuhde on suurin kaasupurkauslampuista. Esimerkiksi Philips SOX 180W antaa valovirran 32 000 luumenta, joka vastaa valotehokkuudeltaan 174 lm/W. Kuviossa 43 on esitetty LPS-lampun valontuoton suhteita.



KUVIO 43. Pienpainenatriumlampun valontuotto. (Halonen, Lehtovaara 1992)

Käyttöikä LPS-lampulle on noin 16 000-23 000 tuntia. Valovirran alenemaa aiheuttaa natriumin sijainti lampussa ja sen lämpötila lampussa. Ikääntyessään olosuhteet purkausputkessa muuttuvat niin, että vähitellen enemmän natriumia kondensoituu purkausputken seinämille nostaen hitaasti jännitehäviötä ja ottotehoa. Mitä enemmän nestemäistä natriumia seinämiin kondensoituu, sitä huonommin purkausputki läpäisee säteilyä. Samalla natriumhöyryn paine laskee lisäten argonin ionisoitumista, joka nostaa syttymisjännitettä. Lopulta purkausputken läpäisemä valovirta on olematon ja syttymisjännite niin korkea, ettei lamppua voida enää uudelleen sytyttää.

LIITÄNTÄLAITTEET

Pienpainenatriumlamput tarvitsevat liitäntälaitteeksi maa-potentiaaliin yhdistetyn, toisiottoman autonimisen muuntajan tai kuristimen. Se estää verkkovirran värähtelyn siirtymistä valonlähteeseen. Säätämistä LPS-lampuille ei suositella, koska muuten vakiona pysyvän lamppuvirran säätö lyhentää lampun käyttöikää eikä saavuta taloudellisia etuja.

LAMPPUTYYPIT JA KÄYTTÖ

Tyypillisesti pienpainenatriumlamput ovat yksi- tai kaksikantaisia. Käyttökohteita ovat mm. tievalaistus, aluevalaistus, rakennusten julkisivuvalaistus sekä suurissa painoteollisuus- ja varastohalleissa, joissa valaistukselta ei vaadita värintoisto-ominaisuuksia tai valon tulee olla monokromaattista.

Ympäristön lämpötilanvaikutus valo-ominaisuuksiin on merkittävä. Vaikka pienpainenatriumlamppuja käytetäänkin pääasiassa ulkovalaistukseen, se reagoi muuttuviin lämpötiloihin herkästi. Oire tästä on lampun jännite häviön ja tehon hidas kasvu esimerkiksi pakkasen kiristyessä. Virran nousu vähentää neutraalien natriumatomien määrää purkauksessa ja alentaa valotehokkuutta.

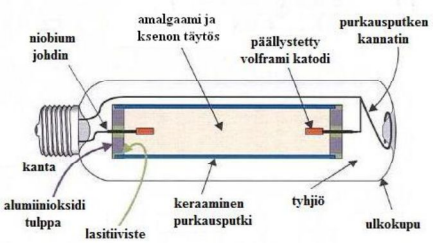
4.2.4 Suurpainenatriumlamput

HISTORIA

Suurpainenatriumlamput HPS (High Pressure Sodium) on alun perin kehitetty parantamaan elohopealamppujen heikkouksia. Niiden myötä mm. lampun koko, valotehokkuus, käyttöikä, energiatehokkuus ja värintoisto-ominaisuudet ovat harpanneet suuren askeleen. Vaikkakin suurin osa natrium lampuista sisältää vielä elohopeaa, on markkinoille saatu myös elohopeavapaita lamppuja.

TOMINTAPRIAATE

HPS-lampun toimintaperiaate eroaa pienpaineisesta esimerkiksi siinä, että natriumhöyrynpaine tulee olla lampun toimiessa noin 10 kPa:lia, jotta saavutetaan maksimaalinen valontuotto. HPS-lampun toimiessa stabiilissa tilassa, natriumin ja elohopean muodostama amalgaamiseos on vain osin höyrystyneenä purkausputkeen. Loput amalgaamista on tiivistyneenä purkausputken kylmäpisteen läheisyydessä, joka sijaitsee putken päässä elektrodien takana. Höyrystyneen amalgaamin määrä ja paine riippuu kylmäpisteen lämpötilasta. Täytökseen lisätään jalokaasua, normaalisti ksenonia (Xe), joka toimii sytytyskaasuna. Volframi elektrodeihin johdetaan vaihtojännitettä (sytytysjännite), jolloin ne toimivat vuoroin anodina ja vuoroin katodina virittäen ksenon atomeja. Kun ksenonkaasu saavuttaa läpilyöntijänniteen, se syttyy käynnistäen reaktiokierron. Kun syttymiskaasu virittyy ja ionisoituu lamppu säteilee himmeää valkoista ksenonin tuottamaa valoa. Lampun lämmetessä, yhä enemmän amalgaamia höyrystyy, jolloin valotuotto kasvaa hitaasti ja värilämpötila muuttuu lämpimämmäksi natriuminpitoisuuden noustessa täytöshöyryssä. Tyypillisesti lämpeneminen kestää 5-10 minuuttia, jolloin lamppu on saavuttanut 80 % lopullisesta valovirrastaan. Tällöin amalgaamin lämpötila on noin 615–750 celsiusta, jossa natriumhöyrynpaine on noin 7 kPa, elohopeahöyryn 60 kPa ja ksenonin noin 20 kPa. Kuviossa 44 on esitetty HPS-lampun tärkeimmät osat.



KUVIO 44. Suurpainenatriumlampun rakenne. (Simpson 2003)

Täytöksen natrium ja elohopea höyrynpaine on huoneenlämmössä hyvin alhainen, mikä pitää niiden läpilyötijännitteen korkeana. Koska sähköisen järjestelmän sytytysjännitteen on oltava suurempi, kuin täytöksen läpilyötijännitteen, voidaan ksenonin avulla laskea läpilyöntijännitettä. Elektroniselta sytyttimeltä vaaditaan siis alhaisempi sytytysjännite. Sytytyskaasun paine huoneen lämmössä on noin 3 kPa. Muissa purkauslampuissa sytytyskaasuina käytettävät argon ja neon soveltuisivat muilta osin myös HPS-lamppuihin, mutta niiden valontuotto-ominaisuudet ovat ksenonia heikommat.

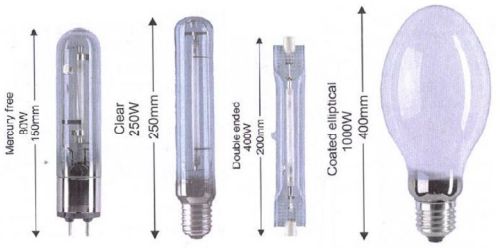
RAKENNE

Purkausputken läpimitta on tyypillisesti 5-10 mm, pituus 50–100 mm ja seinämän paksuus 0,5-0,8 mm. Lamppujännite määräytyy purkausputken kentänvoimakkuuden ja mittojen perusteella. Sen rakenteelta ja materiaalilta vaaditaan lujuusominaisuuksia vaativissa olosuhteissa. Purkausputken seinämien tulee säilyttää muotonsa, jopa 1000 kelvinin lämpöistä natriumhöyryä vastaan, joka on 100 kPa:n paineessa. Koska natrium reagoi herkästi eri materiaalien kanssa, materiaaliksi valitaan usein keraaminen, natriumin reagoinnille immuuni aine. Sintrattu monikiteinen alumiinioksidi on yleisesti käytetty keraaminen purkausputkimateriaali. Se läpäisee noin 90 % syntyvästä säteilystä. Alumiinioksidi säröytyy helposti, joka vaikeuttaa elektrodien kiinnitystä purkausputken päädyissä oleviin alumiinioksiditulppiin. Putken ja päätytulppien tulee olla samankaltaista materiaalia, jotta lämpölaajeneminen tapahtuu samassa suhteessa. Purkausputken ja tulpan välinen sauma sekä johtimen läpivienti elektrodille tiivistetään metalliseoksista valmistetulla lasisulatteella. Saumojen tulee pysyä tiiviinä suurissa paine- ja lämpötila muutoksissa. Johdin materiaalina käytetään niobiumia ja itse elektrodi on volframitappi,

jonka ympäri on kiedottu emissioaineella päällystettyjä volframilankoja. Rakenne on tyypillinen kaasupurkaus elektrodeille.

LAMPPUTYYPIT

Yleisesti käytetyimpiä HPS-lamppuja ovat ellipsi- ja putkilamppu, joissa on E27 tai E40 kierrekanta, mutta kaksikantaisia HPS-lamppuja löytyy suuritehoisimmista valaisimista. Kuviossa 45 on esitetty käytetyimpiä lamppu malleja.



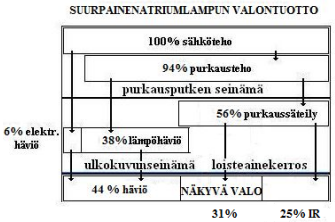
KUVIO 45. Erityyppiset HPS-lamput. (Simpson 2003)

Elohopea vapaissa HPS-lampuissa käytetään myös ksenonkaasua, mutta sen paine on kymmenkertainen normaaliin lamppuun verrattuna. Purkausputki on merkittävästi pidempi ja ohuempi, kuin standardi tyypeissä.

VALONTUOTTO

Valon tuottoon vaikuttaa amalgaamin paine ja väriominaisuuksiin amalgaamin seossuhteet sekä sen lämpötila. Toisin kuin elohopea- tai monimetallilamput, natriumlamppu ei himmene merkittävästi ikääntyessään, sillä purkausputken paine pysyy pitkään stabiilina. Muilta soin valo-ominaisuudet määräytyvät purkausputken mittojen ja – materiaalin sekä ulkokuvun materiaalin. Valotehoa saadaan huomattavasti enemmän, noin 70–150 lm/W selvästi pienemmällä energian kulutuksella. Tästä syystä suurpainenatriumvalaisimet ovat hyvin käytettyjä ja normaalisti LLMF 0,7 voidaan sanoa olevan noin 20 000-36 000 tunnin iässä. Valovirran alenemaan vaikuttaa, elektrodien kuluminen, joka kiihtyy sytytystiheyden kasvaessa. Lisäksi uudelleen sytytys yritykset ennen, kuin lamppu on jäähtynyt riittävästi kuluttavat elektrodeja voimakkaasti. Myös ulkokuvun

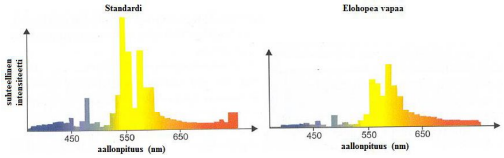
tummuminen ja natriumhävikki vaikuttavat valovirran pysyvyyteen. Kuviossa 46 on esitetty HPS-lampun valontuottoon vaikuttavat häviöt.



KUVIO 46. HPS-lampun valontuotto (Halonen, Lehtovaara 1992)

VÄRIOMINAISUUDET

Lukuun ottamatta muutamaa säteilypiikkiä, HPS-lampun valonspektri on lähes jatkuva, tuloksena voimakkaasti kellertävää, lämpimän sävyistä valoa. D-viivojen tuottamat säteilypiikit aallonpituudella 589 nm, eivät näy spektrissä yhtä selkeästi, kuin LPS-lampussa, koska korkeammassa paineessa täytöskaasu itseabsorptoi suuren osan säteilystä. Lisäksi purkausputken seinämillä, oleva viileämpi plasma absorboi resonanssisäteilyä, muodostaen spektrin keskelle tyhjän kuopan. Spektri levenee kuitenkin tasaisesti molemmilta puolin resonanssisäteilyn aallonpituuksia. D-viivojen resonanssisäteilyn heikkeneminen laskee myös HPS-valaisimen valontuottoa. Spektri koostuu natriumin tuottaman säteilyn lisäksi myös elohopean aallonpituuksista 540-580nm. Elohopea säteilee myös punaisen alueella, kuten kuvion 47 spektristä voidaan huomata. Puskurikaasuna elohopea ei vaikuta oleellisesti spektrin koostumukseen, vaan parantaa lähinnä valotehokkuutta.



KUVIO 47. Elohopean vaikutus suurpainenatiumlampun spektriin. (Simpson 2003)

UV-säteilyn osuus on mitätön, mutta IR-säteilyä syntyy noin 25–30% elohopea pitoisuudesta riippuen. Suurpainenatriumvalaisimien Ra-luku on välillä 20–80 riippuen amalgaamiseoksesta. Oranssin valonsa vuoksi sen värintoisto-ominaisuudet ovat heikommat, kuin elohopea- tai monimetallilampuilla. Värintoisto-ominaisuuksien parantaminen eri puskurikaasuilla laskee lampun valotehokkuutta. Moottoritievalaistuksessa käytettävän pienpainenatriumlappun, Ra-luku on <5. Tämä on natriumvalaisinten ehdoton heikkous, koska spektrin aallonpituudet ovat natriumin vuoksi kelta-oransseja myös HPS-lampuissa. Suurpainenatriumlamppuja voidaan ns."värikorjata", mutta muutokset reaktiossa laskevat valaisimen käyttöikää ja valontuottoa. Lampun ikääntyessä amalgaamin lämpötila laskee ja sen koostumus muuttuu. Tämä on nähtävissä natriumhävikin aiheuttamassa ilmiössä, joka siirtää säteilyä spektrin punaisen suuntaan mitä enemmän polttotunteja kertyy.

LIITÄNTÄLAITTEET

Suurpainenatriumlampussa on purkausjännite, joka riippuu purkauksen tehosta. Tästä syystä lampun on toimittava 5 % sisällä asetetusta lamppujännitteestä. Liitäntälaitteeksi valitaan usein magneettinen kuristin niiden edullisuuden ja yksinkertaisuuden vuoksi. Kuviossa 48 on esitetty valaistussuunnittelussa käytettäviä ohjearvoja eritehoisten kuristimien tehohäviöille.

Suurpainenatriumlamput (kuristin) W

P_{kok} [W]	$P_{häviö}$ [W]	I_N [A]	I_S [A]	
50	62	12	0,29	0,34
70	85	15	0,41	0,54
100	116	16	0,55	0,73
150	170	20	0,83	1,16
250	278	28	1,33	1,70

Symbolien selitys

P_{kok} = lampun ja liitäntälaitteen yhteenlaskettu teho [W]
$P_{häviö}$ = liitäntälaitteen tehohäviö [W]
I_N = lampun palamisvirta [A]
I_S = lampun hetkellinen virta syttymisvaiheessa [A]

KUVIO 48. Liitäntälaitteiden ominaisuudet. (Indoor lighting solutions, Fagerhult Oy 2012-2013).

KÄYTTÖ

Käyttökohteita HPS-lampuille ovat aluevalaistus, suuret hallit ja varastot sekä kohteet, joissa oranssinsävyistä valoa ei koeta epämiellyttäväksi tai siitä ei ole haittaa esimerkik-

si kasvihuoneissa. Taulukossa 9 on esitetty yhteenveto HPS-lampun hyvistä ja huonoista puolista.

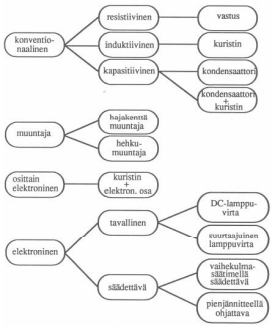
TAULUKKO 9. HPS-lamppujen ominaisuudet.

VAHVUUDET	HEIKKOUDET
• lämpötilan olematon vaikutus valo-ominaisuuksiin • saatavana elohopea vapaina • korkeampi valotehokkuus ja pidempi käyttöikä kuin elohopea- ja monimetallilampulla • hyvä valovirran pysyvyys • pitkä käyttöikä • matala syttymisvirta • HID-lampuista energiatehokkain	• syttymisaika 5-10 min • valon oranssi sävy (2000K) • korkea pintalämpötila • hidas säädettävyys • pitkä jälleen syttymisaika • lamppujen kuolleisuus • huono tärinän kesto • paljon korkeampi syttymisjännite, kuin elohopealampulla

4.2.5 Suurpainepurkauslamppujen elektroniset liitäntälaitteet

Suurpainepurkauslamppua HID (High Intensity Discharge) ei voida liittää suoraan verkkojännitteeseen. Liitäntälaite toimii virranrajoittimena verkon ja lampun välissä ja sen ominaisuudet vaikuttavat lampun toimintaan oleellisesti. Kuristinta käytetään usein liitäntälaitteena vanhemmissa purkauslampuissa. Se on virtaa rajoittava usein induktiivinen elin, joka on toimintaperiaatteeltaan samanlainen, oli kyse sitten elohopea, monimetalli tai suurpainenatriumlampusta. Kuristin suunnitellaan antamaan lampulle yksilöllinen jännite tai virta, mutta pääasiassa kaikki kuristimet (<1kW valaisimiin) toimivat 230 voltin yksivaihe syötöllä. Elohopea- sekä monimetallilamput ovat vakio jännitteellä toimivia, eikä niiden toimintaan vaikuta verkkojännite. Suurpainenatriumlampussa on purkausjännite, joka riippuu purkauksen tehosta. Tästä syystä lampun on toimittava 5% sisällä asetetusta lamppujännitteestä. Kuviossa 49 esitetty liitäntälaitteet jaotellaan toimintaperiaatteensa mukaan.

Suurpaineisissa kaasupurkauslampuissa elektronisella liitäntälaitteella on pyritty parantamaan valontehoa, poistamaan välkyntää sekä pienentämään liitäntälaitteen kokoa. Niiden avulla lampun teho voidaan stabiloida, jonka vaihtelu muuten näkyisi valovirran ja valon värin muutoksina (akustiset resonanssit).



KUVIO 49. Purkauslamppujen liitäntälaitteet (Halonen, Lehtovaara 1992)

Elektronisia liitäntälaitteita on käytetty lähinnä projektoreissa, kuvausvaloissa sekä autojen purkauslampuissa jo pitkään. Hintojen laskun myötä niitä on saatu markkinoille myös korkeapaineisiin purkauslamppuihin. Taajuuksien ollessa korkeampia kuin loistelamppujen elektronisissa liitäntälaitteissa, on haasteena ollut akustisien resonanssien hallinta, joita alkaa esiintyä 1 kHz tuntumassa. Niitä ilmenee kaikilla loistelampuissa käytetyillä taajuuksilla. Akustisia resonansseja syntyy, kun lampun tehoa muutetaan. Se saa aikaan paineaallon purkausputkessa, jonka vaikutuksesta purkaus on epävakaa ja plasman lämpötila ja paine muuttuvat. Tämä näkyy lampun valovirran ja värin vaihteluna sekä valossa voi esiintyä välkkymistä. Samalla lamppujännite nousee, jonka seurauksen lamppu saattaa sammua äkillisesti.

Toimiva tapa estää resonanssien syntyminen on vakioida lampun toimintataajuus sopivalle tasolle, jolla resonansseja ei esiinny. Jos taajuutta lähdetään nostamaan, täytyy sen ylittää 350 kHz ennen kuin resonanssien syntyminen lakkaa. Sen ylläpitäminen vaatii elektronisilta komponenteilta liikaa käyttöiän ja kustannusten pitämiseksi inhimillisinä. Käytössä oleva menetelmä hyödyntää matala taajuista kanttiaaltoa välillä 90-200Hz. Monimetalli- ja suurpainenatriumlamppuihin on saatavana tähän tekniikkaan perustuvia elektronisia liitäntälaitteita.

Elektronisista liitäntälaitteista saadaan paras hyöty pienillä 30-100W lampuilla. Niiden ansiosta valotehokkuus nousee, kun jännitteen taajuus nousee. Elektronisten liitäntälaitteiden tehohäviöt ovat pienemmät, kuin kuristimella mikä myös osaltaan parantaa kokonaisvalotehoa. Ne ovat varustettu turvatoimilla, joiden tehtävä on katkaista virta jos lamppu ylittää lämpötilan ylärajan tai se rikkoutuu.

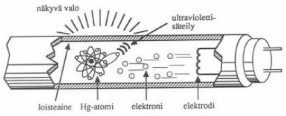
4.2.6 Loistelamppu

HISTORIA

Loistelamppu on alun perin ranskalaisen fyysikon Alexander E. Becquerelin kehittämä vuonna 1857. Kaikkia sai alkunsa hänen tutkiessaan fluoresenssi ja fosforenssi ilmiöitä. Testauksessa elektroninen purkausputki päällystettiin loisteaineella, joka saatiin emittoimaan valoa elohopeahöyryn reagoidessa putken sisällä matalassa paineessa. Loiste-putket muistuttivat jo silloin hyvin paljon nykyisiä loistelamppuja.

TOIMINTAPERIAATE

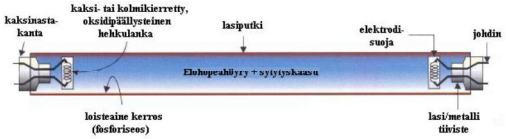
Valontuotto perustuu purkausputkessa synnytettävään kaasupurkaukseen. Putken täytösjalokaasuna käytetään mm. argonia, kryptonia, neonia tai näiden seosta. Täytekaasun paine on elohopeapurkauslamppuun verrattuna alhaisempi noin 200–600 Pa. Sen tarkoituksena on helpottaa syttymistä ja johtaa tasaisesti sähkömagneettista purkausta pitkän purkausputken mitalla. Purkausreaktion käynnistetään sytyttimellä, jota kontrolloidaan magneettisella tai elektronisella kuristimella. Purkausputken molemmissa päissä olevat elektrodit ovat kytketty vaihtojännitteeseen ja ne vaihtavat tilojaan vuoroin anodiksi ja vuoroin katodiksi. Elektronien lämpötilan noustessa noin 1100 asteeseen ne alkavat emittoida elektroneja siirtäen virtaa anodin ja katodin välillä. Kuviossa 50 on esitetty loistelampun toimintaperiaate.



KUVIO 50. Loistelampun toimintaperiaate (Halonen, Lehtovaara 1992)

Kun purkaus käynnistyy, laskee elohopeahöyryn paine noin 1-1,3 Pa, putken saavuttaessa toimintalämpötilansa. Purkauksen voimasta liikkuvat elektronit törmäävät eloho-

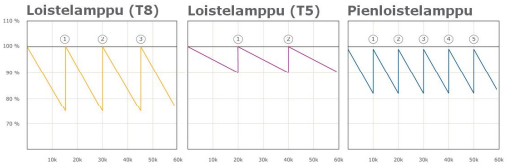
pea-atomeihin ja virittävät niitä. Elohopeanionien purkaessa viritystä takaisin perustilalle se säteilee resonanssitaajuudellaan, jonka aallonpituus on 256 nm. Tätä säteilyä ihminen ei pysty havaitsemaan, koska aallonpituus on ultravioletti alueella. Purkauksessa syntyy myös muita aallonpituuksia, joista silmä voi kuitenkin havaita vain noin 10 %. Varsinainen näkyvän valon tuotto tapahtuu resonanssitaajuuden avulla, kun UV-alueen resonanssisäteily virittää purkausputken seinämissä olevan fosfori loisteainekerroksen atomeja. Kuviossa 51 on esitetty loistelampun tärkeimmät osat.



KUVIO 51. Loistelampun rakenne. (Simpson 2003)

VALONTUOTTO

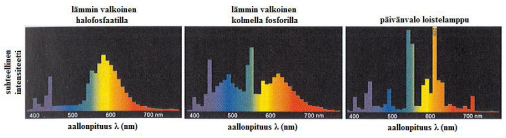
Loistelampulla voidaan muuttaa noin 20 % syötettävästä sähköenergiasta näkyvän valon aallonpituuksiksi. Tämä tarkoittaa suurta lämpöhäviön osuutta, jossa syntyy myös paljon IR-säteilyä. Teoreettinen valotehokkuus loistelapuille on välillä 25–80 lm/W, mutta T5 loistelampulla voidaan saavuttaa jo lähes 100 lm/W arvoja. Valotehokkuus riippuu purkausputken pituudesta, fosforien laadusta ja jännitteen syöttötaajuudesta. Käyttöikä 6 000-15 000 tuntia. Kuviossa 52 on esitetty valovirran alenemaa eri loistelampuilla.



KUVIO 52. Loistelamppujen vaihtoväli 50 000tunnin käyttöaikana (www.glamox.fi, valovirranpysyvyys-arvot)

VÄRIOMINAISUUDET

Purkauksessa syntyvän säteilyn aallonpituudet ovat 254, 313, 365, 405, 546, 578 nm. Elohopeahöyryn ionisoituessa resonanssisäteily on suurilta osin UV-alueella, mutta se voidaan muuttaa näkyvän valon aallonpituuksiksi käyttämällä eri loisteaineita purkausputken pinnoitteena. Fosforit ovat epäorgaanisia kideseoksia, joihin on lisätty pieniä määriä metallia käynnistämään fluoresenssi loisteaineessa. Tämä ilmiö saa alkunsa, kun UV-säteily stimuloi fosforiseoksen elektroneja korkeammalle energiatasolle, synnyttäen samalla lämpöenergiaa. Kun elektroni putoaa takaisin normaalille tilalle, siitä emittoituu fotoneita, joiden aallonpituudet ovat näkyvän valon alueella. Fluoresenssi on säteilyä, joka emittoituu UV-säteilyn vaikutuksesta ja fosforenssi on säteilyä, jonka emittoituminen jatkuu säteilyn poistuttua vielä hetken. Kuviossa 53 on esitetty eri tekijöiden vaikutusta loistelampun spektriin.



KUVIO 53. Täytöksen ja loisteaineen vaikutus spektriin (Simpson 2003)

Spektrin koostumus on niin sanottu ainespektri, jossa jokainen loisteaine säteilee sille ominaisella aallonpituudella. Halvempien loisteaineiden värintoisto on noin Ra-50, mutta parempiin värintoisto arvoihin päästään käyttämällä kolmen fosforin teknologiaa. Sekoittamalla kolmen päävärin fosforeja, voidaan muodostaa jatkuvaspektri punaisen (610nm), vihreän (545nm) ja sinisen (450nm) spektrikomponentin avulla ja saavuttaa Ra 80–85 värintoisto. Päivänvaloloistelampuilla voidaan kuitenkin saavuttaa, jopa yli R_a -90 värintoisto, joka toteutetaan arvokkaammilla monikaista-fosforeilla. Loisteainekerroksen koostumus määrittää myös valon värilämpötilan. Loistelamppujen standardi valkoiset ovat CCT arvoiltaan 3000K lämmin valkoinen, 3500K valkoinen, 4000K kylmä valkoinen ja 6500K päivänvalo. Toimistotiloissa sen sijaan on alettu käyttää luonnonvalkoista, sinertävää ja viileää valoa 5500-6500K.

LAMPPU TYYPIT

Loistelamppujen valikoima on hyvin laaja. Niiden toimintaperiaate säilyy silti samana, vaikka täytöskaasu, sytytyskaasu ja loisteaineiden ominaisuudet vaihtelevat. Loistelamput voidaan jakaa kahteen ryhmään, yksi ja kaksikantaisiin. Kaksikantaisista loistelampuista käytetyimpinä ovat jo käytöstä poistuva T12 ja T8, sekä niitä korvaamaan suunniteltu energia- ja valoteholtaan kehittyneempi malli T5. Siinä purkausputken halkaisijaa on kavennettu, jolloin valontuotto saadaan maksimoitua. Taulukossa 10 on esitetty yleisimmät loistelamput.

TAULUKKO 10. Pitkät loistelamput (Lighting control technology and applications, Robert S. Simpson)

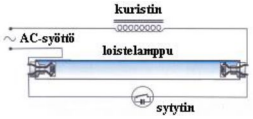
TYYPPI	PITUUS	NIM.TEHO	PUTKIVIRTA
T12	2,400mm	100W	950mA
T12	1,800mm	85W	800mA
T12	1,500mm	65W	670mA
T12	1,200mm	40W	430mA
T12	590mm	20W	370mA
T8	1,800mm	70W	700mA
T8	1,500mm	58W	670mA
T8	1,200mm	36W	430mA
T8	590mm	18W	370mA
T8	438mm	15W	310mA
T5	1,449mm	80W	540mA
T5	1,449mm	35W	170mA
T5	1,149mm	54W	450mA
T5	1,149mm	28W	170mA
T5	849mm	39W	325mA
T5	849mm	21W	165mA
T5	549mm	24W	295mA
T5	549mm	14W	165mA

Halkaisijat putkille ovat T12 38mm, T8 26mm ja T5 16mm. T8 ja T5-malleja voidaan himmentää ainoastaan elektronisilla liitäntälaitteilla. Purkausputken täytöskaasun paine vaikuttaa olennaisesti lampun käyttöikään. Loistelampuilla on taipumus menettää valotehoaan käytössä ja yhtenä syynä valovirran alenemaan on täytöskaasun alhainen paine. Tilanne on ongelmallinen, sillä täytöskaasun paineen nostaminen estää lampun päiden tummumista ja parantaa valovirran pysyvyyttä, mutta laskee lampun ominaisvalovirtaa ja heikentää purkauksen syttymistä.

LIITÄNTÄLAITTEET

Koska loistelamppu on vakio jännitteinen valonlähde, se tarvitsee virranrajoittimen eli kuristimen. Kuristimia on kahdenlaisia, vanha magneettikuristin ja uudemmissa loistevalaisimissa käytettävä elektroninen kuristin. Sen tehtävän on rajoittaa purkauksen ot-

tamaa virtaa ja ohjata sen toimintaa. Kuviossa 54 on esitetty loistelampun kytkentä sähköverkkoon.



KUVIO 54. Loistelampun kytkentä (Simpson 2003)

Magneettisilla kuristimilla varustettuja vanhempia loistevalaisimia korvataan elektronisin liitäntälaittein. Elektronisilla liitäntälaitteilla voidaan syöttää sytyttimelle ja purkausputkelle omat jännitteet. Tämä on pidentänyt loistevalojen käyttöikää ja valon laatua merkittävästi. Niiden etuna on ennen kaikkea noin 15 % pienempi energiankulutus, mutta myös 10 % hyötysuhteen nousu. Elektronisilla liitäntälaitteilla voidaan poistaa myös työskentelyä heikentävää haitta välkyntää, jota ihminen ei kykene erottamaan, mutta aivot rekisteröivät sen tiedostamatta. Toimintataajuuden noustessa 40 kHz:n lamppu palaa tasaisesti välkkymättä. Lisäksi lämpö- ja tehohäviöiden osuus laskee eikä sytytintä tarvitse lampun vaihdon yhteydessä erikseen uusia, koska se on integroitu liitäntälaitteeseen. Magneettisilla kuristimilla varustetut loistelamput, menettivät käyttöikäänsä Päälle/Pois kytkentöjen myötä. Sytytys virtapiikki kulutti elektrodia, joka myös höyrystyi vähitellen. Lämminkäynnistyksellä varustettu liitäntälaite esilämmittää katodit ennen sytytystä, joten hehkulankaa kuormitetaan vähemmän.

KÄYTTÖ

Loisteputkea käytetään yleisvalaisimena työtiloissa, joita ovat esimerkiksi toimistot ja opetustila. Myös suuret hallit ja pitkät käytävät voidaan valaista toimivasti loistevaloilla. Taulukossa 11 on esitetty loistelampulle tyypillisiä ominaisuuksia.

TAULUKKO 11. Loistelampun ominaisuudet.

VAHVUUDET	HEIKKOUDET
• hyvä ohjattavuus • säätyy portaattomasti (mm.T5) • saatavana elohopea vapaina • hyvä valovirran pysyvyys • korkea valotehokkuus • ei akustisia resonansseja • laaja värilämpötila valikoima	• ympärisäteilijä, putken takaa valo joudutaan heijastamaan • vanhat lamput energiasyöppöjä • hyötysuhde • vanhemmat lamput sisältävät elohopeaa • suuri koko • ulkonäkö

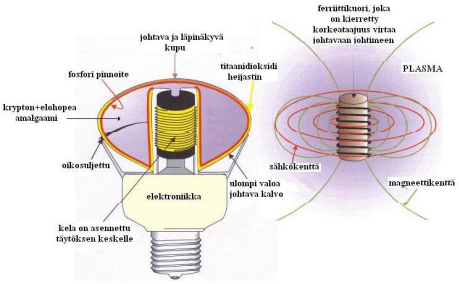
4.2.7 Induktiolamppu

HISTORIA

Ensimmäiset induktiiviseen kaasupurkaukseen perustuvat lamput patentoitiin jo vuonna 1907. Ensimmäiset lamput olivat alkeellisia, mutta myöhemmin kompaktin tehoelektroniikan kehityttyä riittävästi alkoi induktiolamppujen teknologia kehittyä nopeasti. Induktiolamppujen suunnittelu on jatkuvaa tasapainottelua kaasupurkauksen ominaisuuksien sekä lampun hyötysuhteen kanssa. Lampun tulee täyttää myös EMC- vaatimukset. Sähkömagneettisella yhteensopivuudella EMC (Electromagnetic Compatibility) tarkoitetaan elektronisen laitteen kykyä toimia luotettavasti luonnollisessa toimintaympäristössään. Nykyisin valmistajat käyttävät kolmea erityyppistä teknologiaa induktiolampuissaa.

TOIMINTAPERIAATE

Induktiolampussa valo tuotetaan sähkömagneettisen induktion ja kaasupurkauksen avulla. Lampussa ei ole hehkulankaa tai elektrodeja vaan induktiokela. Se synnyttää suuritaajuisen energiavirran lampun täyttökaasuun, joka yleisimmin on pieneen paineeseen puristettu krypton ja elohopeakaasuseos. Suuren taajuuden tuottamiseksi lamppu tarvitsee ulkoisen suurtaajuusvirtalähteen. Induktiokelan muodostama sähkövirta ionisoi täyttökaasun, jota seuraa kaasupurkaus. Kuten kaasupurkausvaloissa yleensä purkauksessa syntyvät ultravioletti säteet muutetaan lampun kuvun sisäpinnalla loisteaineen avulla näkyväksi valoksi. Kuviossa 55 on esitetty, kuinka induktiolamppu tuottaa valoa.



KUVIO 55. Lighting Genura™ Induktiolampun rakenne (Simpson 2003)

YLEISET OMINAISUUDET

Värilämpötilaltaan induktiovalaisimet ovat kylmän valkoisia 5000-6500K välillä, johtuen elohopeatäyttökaasusta. Pienitehoisemmissa lampuissa on myös 2700 ja 3000 Kelvinin vaihtoehtoja. Niiden tuottaman viivaspektri muistuttaa elohopealamppua eli koostuu pääasiassa aallonpituuksista välillä 420–520 nm. Värintoisto ominaisuudet ovat kuitenkin korkeammat $R_a \geq 80$.

LAMPPUTYYPIT

Lamppuja valmistetaan erityyppejä, mutta perusmalleja ovat neliöputket esimerkiksi Osram Endura ja hehkulampun näköiset pyöreät lamput, kuten GE Lihting Genura. Rengasta muistuttavissa lampuissa on kaksi kuristinta eripuolilla kehää, joilla täytöskaasua virittävä sähkökenttä saadaan aikaan. Liitäntälaitteet ovat elektronisia ja niitä myydään integroituina lamppuun tai erikseen asennettavina erityisesti suuritehoisemmille valaisimille. Valaisinvaihtoehtoja on tarjolla eniten tehoalueella 70–400 W.

VALONTUOTTO

Valotehokkuudet ovat noin 80–100 lm/W. Valmistajat lupaavat lampuilleen, jopa 60 000 tunnin paloaikoja. Käyttöikään vaikuttaa oleellisesti se seikka, ettei induktiolampussa ole lainkaan kuluvia osia kuten hehkulankaa. Käyttölämpötilana ilmoitetaan noin -10…+40C° ja lampun pintalämpötilan ilmoitetaan nousevan maksimissaan +65 C°.

4.2.8 Valoa emittoiva diodi

HISTORIA

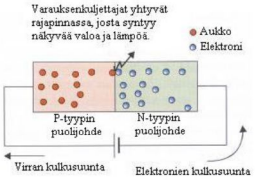
LED (Light Emitting Diode) eli valoa emittoiva diodi on puolijohdekomponentti, jolla sähköenergia voidaan muuttaa sähkömagneettiseksi säteilyksi elektroluminanssin avulla. Diodin kyvystä tuottaa näkyvää valoa tehtiin ensimmäiset havainnot jo 1900-luvun alkupuolella, mutta puolijohdekomponenttien tavoitteellinen kehitys aloitettiin vasta 1960-luvulla. Lähtö tilanteessa LEDit toimivat lähinnä merkkivaloina erilaisissa merkinantojärjestelmissä. Myöhemmin teknologian kehittyessä, puolijohdemateriaaleihin esiteltiin vaihtoehtoisia yhdistelmiä. 1980-luvun loppu puolella alkoi tehokkaiden LEDien kehitys Alumiini-indium-gallium-fosfideilla, jotka tuottivat puna-oranssia valoa välillä 590-630nm. Samoihin aikoihin ensimmäiset siniset piikarbidi pohjaiset LEDit

kehitettiin, mutta niiden valotehokkuus oli vielä vaatimaton. Vasta vuonna 1993 japanilainen tiedemies ratkaisi sinisen LEDin arvoituksen käyttäen Gallium-Nitridinä ja tehokkaan sinivihreän aallonpituudet 450–525 nm saatiin markkinoille. Sinisen LEDin kehitys mahdollisti myös valkoisen valon tuoton. Keltaisella fosforipinnoitteella päällystettyjä sinisiä LEDejä voitiin nyt käyttää myös kohdevalaistuksessa. Tämän jälkeen ledien käyttö levisi laajasti erilaisiin sovelluksiin, kuten näyttöihin ja spottivalaistukseen. LED-komponenttien heikko valotehokkuus on pitkään ollut ongelma niiden käytölle yleisvalaistuksessa. Viime vuosien aikana uudensukupolven LEDillä on saatu tuotettua vaadittavat valo-ominaisuudet myös yleisvalonlähteenä ja LED- valistusratkaisut ovat alkaneet korvata vanhaa lamppukantaa. Ne ovat kilpailukykyisiä pienen kokonsa, alhaisen energiankulutuksen ja pitkän käyttöiän ansiosta. (Schubert 2006)

TOIMINTAPERIAATE

LED-sirun toimintaperiaate poikkeaa täysin muista valonlähteistä. LEDi eli hohtodiodi on elektroniikan puolijohdekomponentti, joka toimii kun siihen johdetaan tasajännitettä. Se päästää sähkövirran kulkemaan lävitseen vain yhteen suuntaan, jota kutsutaan päästösuunnaksi. LED-ydin koostuu kahdesta puolijohdemateriaalista, joiden elektronitasapaino poikkeaa toisistaan. Toinen puolijohteista on positiivisesti varautunut P-tyypin materiaaliseos, jonka atomien radoilla on elektronivajausta eli aukkoja. Toinen puolijohteista on negatiivisesti varautunut N-tyypin materiaaliseos, jonka atomeissa liikkuu vapaasti ylimääräisiä elektroneja. Puolijohteita erottaa niiden välissä oleva rajapinta.

Kun P-N-puolijohteeseen ei johdeta sähkövirtaa, elektronit pysyvät lepotilassa ja rajakerros on tyhjä. Riittävän suuren päästösuuntaisen tasajännitteen kytkeytyessä, sähkökenttä työntää virrankuljettajat (elektronit ja positiiviset aukot) liikkeelle. Ne siirtyvät rajapinnan yli, jolloin sähkövirta kulkee diodin läpi. Elektronit yhtyvät vastaan tuleviin atomeihin, joiden radoilla on elektronivajausta. Tätä ilmiötä kutustaan suoraksi emissiorekombinaatioksi, jossa korkeammalla energiatasolla oleva elektroni putoaa johtavuusvyöstä atomin valenssivyön tyhjälle sidostilalle eli aukolle vapauttaen valokvantin. Osa näsitä rekombinaatioista on epäsuoria, jolloin syntyvä energia aiheuttaa värähtelyä ja muuttuu lämmöksi. Kuvio 56 esittää rajapinnassa tapahtuvaa rekombinaatioita.



KUVIO 56. Reaktio puolijohderajapinnassa (Schubert 2006)

LED tuottaa valoa silloin, kun siihen kytketty päästösuuntainen jännite ylittää kynnysjännitteen arvon. Kynnysjännite on riippuvainen valon väristä, joka toteutetaan erilaisilla puolijohde yhdistelmillä. LEDin päästösuuntaisen syöttöjännitteen on oltava suurempi tai yhtä suuri, kuin rajapinnassa säteilevien fotonin luovuttama energia. Esimerkiksi sinisen LEDin fotoni säteilee 450-500nm aallonpituudella, säteilyenergian ollessa noin 2,6 elektronivolttia, joka määrää kynnysjännitteen arvoksi 2,6 volttia. Syöttöjännitteen noustessa LED tuottaa yhä enemmän valoa, mutta myös lämpöä. Virranrajoitinta tarvitaan estämään syöttöjännitteen nousun yli rajan, jossa komponentti rikkoutuu. Näkyvän valona fotoneilla, säteilyenergia on 1,75–3,1 elektronivoltin välissä.

Taulukossa 12 on esitetty eriväristen LEDien kynnysjännitteet sekä yleisesti käytetyt puolijohdemateriaalit. Jotta suurin osa rekombinaatioista tapahtuisi suoran transistion tavoin, valitaan puolijohteiksi kaksi seuraavista: gallium, arseeni, alumiini, indium tai fosfori. Näiden aineiden joukosta pyritään valitsemaan pari, joiden johtavuusvyön minimi ja valenssivyön maksimi sijaitsevat samalla kohdalla. Tällöin elektrodien ja aukkojen välinen liike on pystysuoraa, fotoneita emittoituu enemmän ja säteilemättömien epäsuorien transistioiden osuus on pienempi, jotka lämmittävät lediä. (Schubert 2006)

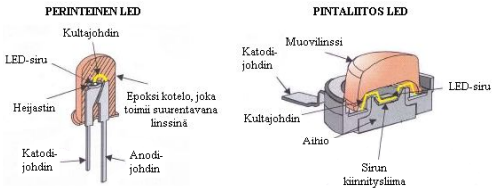
TAULUKKO 12. Värillisten LEDien kynnysjännitteet (www.wikipedia.fi)

VÄRI	Aallonpituus (nm)	Kynnysjännite (V)	Puolijohdemateriaali
UV	λ<400	3,1<ΔV<4,4	yhdistelmä monista
purppura	380 < λ < 430	2,48<ΔV<3,7	yhdistelmä monista
violetti	400 < λ < 450	2,76<ΔV<4,0	7
sininen	450 < λ < 500	2,48<ΔV<3,7	7/8/9
vihreä	500 < λ < 570	2,18<ΔV<4,0	5/6/7/10
keltainen	570 < λ < 590	2,10<ΔV<2,18	1/2/3/5/6/
oranssi	590 < λ < 610	2,03<ΔV<2,10	1/2/4/6
punainen	610 < λ < 760	1,63<ΔV<2,03	1/2/4/5/6
IR	400 < λ < 450	ΔV<1,9	3/5
VALKOINEN	jatkuva spektri	ΔV=3,5	Sininen diodi ja keltainen fosforipäällyste

1. Gallium (Ga)
2. Gallium fosfaatti (GaP)
3. Gallium arseeni (GaAS)
4. Gallium arseeni fosfaatti (GaAsP)
5. Alumiini gallium arseeni (AlGaAs)
6. Alumiini gallium indium fosfaatti (AlGaInP),
7. Indium gallium nitridi (InGaN)
8. Sinkki seleeni (ZnSe)
9. Pii karbidi (SiC), Pii (Si)
10. Nitridi (GaN)

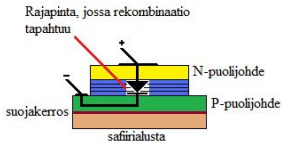
RAKENNE

Rakenteeltaan LED-valaisin koostuu kytkentäpinneistä, puolijohdesiruista ja kotelosta, johon komponentit on valettu. Rakenteita on paljon erilaisia riippuen sovelluksesta ja LED-sirulta vaadituista ominaisuuksista. Koska elektroluminanssissa syntyy lämpöä, on uusissa pintaliitos LED-valaisimissa ytimen yhteyteen liitetty jäähdytyselementti, joka estää sirua lämpenemästä valontuotolle ja komponenteille haitalliselle tasolle. Valon säteilyn suuntaan voidaan vaikuttaa valaisinrungon heijastimilla sekä rajata avautumiskulmaa erilaisilla kuvuilla. Lisäksi valon häikäisyä voidaan vähentää lisäämällä valaisimeen optinen kalvo esimerkiksi opaaliakryyli, joka toimii diffuusorina säteilylle. Valon jakaumaan sirun ympärille vaikutetaan linssimateriaaleilla, joka yleensä toteutetaan muovilla tai silikonilla. Kuviossa 57 on esitetty perinteisen- ja pintaliitos LEDin rakenteet.



KUVIO 57. LEDin rakenne (Simpson 2006)

Yhdestä hohtodiodista saadaan harvoin riittävä määrä valoa, joten ne voidaan yhditää ryhmiksi samalle alustalle. Multichip on usean LEDin muodostama valonlähde, jota hyödynnetään mm. LED-heittimissä ja syväsäteilijöissä suuremman valotehokkuuden aikaansaamiseksi. Siinä samalle piirilevylle on kiinnitetty useita hohtodiodeja. LED-moduuli on myös hohtodiodiryhmä, joka voidaan suunnitella valaisimeen antamaan haluttu valotehokkuus ja usein moduuli on mahdollista vaihtaa ilman, että valaisinta joudutaan uusimaan. Kuviossa 58 on esitetty esimerkki, kuinka LED voidaan koota safiirialustan päälle.

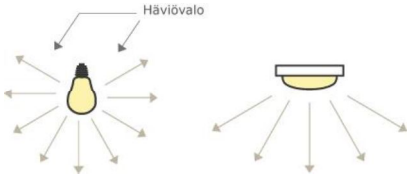


KUVIO 58. Rajapintadiffuusio (Schubert 2006)

VALONTUOTTO

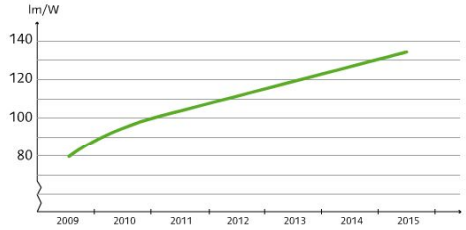
LEDit pystyvät tuottamaan matalalla energiankulutuksella paljon valoa. Niiden valotehokkuus kasvaa nopeasti uusien innovaatioiden syntyessä ja laboratorio-olosuhteissa voidaan saavuttaa jo 270 lm/W hetkellisellä pulssilla. Todellisuudessa näitä tehoja LEDille ei pystytä vielä tuotteistamaan, mutta lähitulevaisuudessa se on mahdollista sillä valotehokkuuden vuotuinen kasvu on noin 10 %. LEDit eivät ole ympärisäteileviä kuten muut valonlähteet, tuotettu valo saadaan hyödynnettyä tehokkaammin ilman heijastu-

mista. Kuviossa 59 on esitetty häviövalon osuutta, joka joudutaan heijastamaan haluttuun suuntaan.



KUVIO 59. LEDien avautumiskulma noin 120 astetta (www.glamox.fi)

LEDeillä tuotettu valo on suunnattu sirusta normaalisti 120 asteen avautumiskulmaan. Tämä on valaisimen hyötysuhteen kannalta hyvä asia sillä ympärisäteilevissä valonlähteissä valoa joudutaan ohjaamaan heijastimilla ja hyötysuhde laskee. LED-sirun tuottamaa valoa voidaan suunnata kuvuilla ja erilaisilla optiikoilla, mutta pääasiassa valoa tuotetaan valonlähteen etupuolelle, josta se on helppo saada hyödynnettyä ilman häviöitä. Tulevaisuudessa LED-tekniikka kehittyy edelleen. Kuviossa 60 on esitetty kuinka valotehokkuuden on arvioitu nousevan lähivuosina.

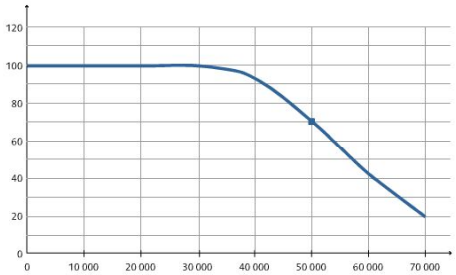


KUVIO 60. Valotehokkuuden kehitysarvio vuoteen 2015 mennessä (Fagerhult Oy, PDF LED-esite)

Teoreettinen valotehokkuus LED-sirulle on 75–500 lm/W, mutta ongelmana on saada kaikki säteily ulos valonlähteestä. Suurin osa säteilystä on sirun sisällä heijastuvaa valoa, joka on lopulta absorboitunut LED-ytimeen ennen pääsyään ulos sirusta. Tämä johtuu rekombinaatioissa syntyvien fotonien säteilystä satunnaisiin suuntiin rajapinnasta.

Mikäli tulevaisuudessa keksitään keino suunnata fotonit haluttuun suuntaan rajapinnasta, nousevat valotehokkuudet merkittävästi.

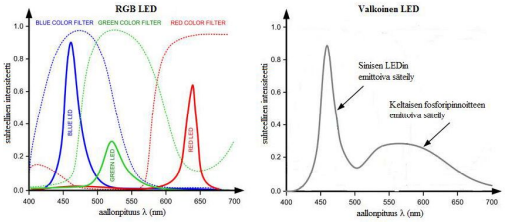
Käyttöikä määritellään LED-sirulle ilmoittamalla se aika, jonka jälkeen alkuperäisestä valovirrasta on jäljellä 70 %. Käyttöiän ilmaisemisen valmistajat käyttävät lyhennettä L70, kuten kuviossa 61 on esitetty ja, joka tyypillisesti LED-sirulle on 50 000tuntia. Valovirran alenemakerroin LLMF on LED-siruille 0,7.



KUVIO 61. LEDin valovirran pysyvyys (Fagerhult Oy 2013)

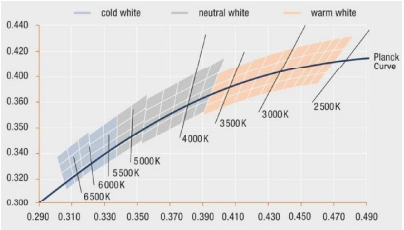
VÄRIOMINAISUUDET

LEDien värilämpötilaan voidaan vaikuttaa erilaisilla puolijohde materiaaleilla ja niiden yhdistelmillä sekä erilaisilla loisteaine päällysteillä ja värillisillä linsseillä. Valkoinen LED voidaan toteuttaa päällystämällä sininen LED-siru keltaisella fosforilla, jonka loisteaine emittoi valkoisena valona. Värien tuottamiseen käytetään RGB-LEDejä (RED-GREEN-BLUE), joilla voidaan saada aikaan kaikki näkyvänvalon sävyt. RGB-LEDissä samaan koteloon on pakattu kolmea pääväriä (sininen 470nm, vihreä 525nm ja punainen 626) säteilevät diodit. Niiden säteilysuhdetta säätämällä aallonpituudet summautuvat ja tuloksena on CIE-1931 värikoordinaatistosta kolmion keskelle muodostuva väriaistimus. Esimerkiksi kaikkien säteillessä yhtä kirkkaasti ovat eripuolilla värikoordinaatistoa olevat pisteet yhtä kaukana toisistaan ja syntyvä valo väriltään valkoista. Normaalisti syntyvä säteily on näkyvänvalon alueella eikä UV- ja IR-säteilyä synny. Kuviossa 62 on esitetty kaksi käytetyintä tapaa tuottaa valkoista valoa LED-sirulla.
(Simpson 2003)



KUVIO 62. RGB- ja valkoisen LED-valaisimen spektri
(www.ideatoreality.wordpress.com)

Suuri mullistus LED-teknologiassa oli sinisen LEDin keksiminen. Pinnoittamalla sininen hohtodiodi keltaisella fosforiloisteainekerroksella saatiin LEDi säteilemään valkoista valoa. Tämä mahdollisti LEDien käytön kohdevalaistuksessa ja valotehokkuuden noustessa yhä korkeammaksi voitiin ensimmäiset LED-yleisvalaisimet tuoda markkinoille. Valkoisen LEDin värilämpötiloja esitetään kuviossa 63, jossa nähdään, kuinka puolijohteiden luokkia kuvaavat pystysarakkeet vaikuttavat värilämpötilaan. Valitsemalla puolijohdemateriaaleja koordinaatiston avulla, voidaan toteuttaa haluttu värilämpötila.



KUVIO 63. Valkoisen LEDin puolijohdeluokat (LED-esitys, www.osram.fi)

LÄMPÖTILAN VAIKUTUS

Lämpötilanvaikutus LEDin toimintaan on merkittävä. Lämpötilan muutos saa aikaan LED-sirun komponenttien muutoksen lämpölaajenemisen kautta, joka vaikuttaa myös

valo-ominaisuuksiin. LEDin käyttö viileässä parantaa sen valovirtaa. Atomien väliset etäisyydet lyhenevät, koska johtavuusvyö sekä valenssivyö kapenevat ja niiden välisen rajapinnan tilavuus (kielletty energiaväli) kasvaa. Rekombinaatioita tapahtuu nopeammin, jolloin fotoneita emittoituu enemmän. Tästä syystä LED-valaisimet ovat hyvin käytettyjä ulkovalaistuksessa ja kylmissä tiloissa, kuten pakkashuoneissa, jolloin lämpötila voi laskea jopa -40 asteeseen. Lämpötilan nousu taas vaikuttaa LEDin käyttöikään, valovirtaan ja sen alenemaan sekä myös valotehokkuuteen heikentävästi. Atomien etääntyessä toisistaan, rajapinta supistuu ja rekombinaatioiden syntyminen hidastuu laskien myös emittoituvien fotonien energiaa. Epäsuorien transitioiden määrä lisääntyy kiihdyttäen lämmön syntymistä entisestään ja pudottaen optisen säteilyn määrää. Lämpötila nostaa myös syntyvän säteilyn aallonpituus kasvaa. Käyttölämpötilan ollessa +40-50 astetta alkaa valo-ominaisuudet heikentyä merkittävästi.

LIITÄNTÄLAITTEET

Termisten- ja luminanssisäteilijöiden himmennys sekä Päälle/Pois kytkennät nopeuttavat niiden valovirran-alenemaa ja siten lyhentävät käyttöikää. Syynä on sähkövirralla lämmitettävän elektrodimateriaalin kuluminen sytytysvirtapiikissä sekä sen hidas höyrystyminen ympäröivän suojakuvun seinämille, absorboiden syntyvää säteilyä. Vaikkakin LEDit luokitellaan luminanssisäteilijöiksi, niiden toiminta perustuu elektroluminanssiin, jonka tuottavat jännitteen avulla viritetyt elektronit ja aukot. Toisin, kuin muut valonlähteet, LED-sirut syttyvät välittömästi ja niiden himmennys pulssileveysmodulaatiolla pidentää niiden käyttöikää. Päälle/Pois kytkennät sekä himmennys auttavat LEDiä säilyttämään valovirtansa eli hidastaa valovirran alenemaa. Tavallisen LED-sirun himmennyksessä ja ohjauksessa käytetään pulssileveysmodulointia sekä virranohjausta.

Pulssileveysmodulointi (PWM, Pulse-Width Modulation) tarkoittaa kuormalle menevän jännitteen säätöä muuttamalla sen pulssisuhdetta. Esimerkiksi himmennys 50 % valotehoon, toteutetaan hyvin nopeataajuisella jännite kanttiaallolla, jonka lähtösignaalin keskiarvo yhden värähtelyjakson aikana on sama, kuin modulointisignaalin arvo. Kanttiaalto on vuoroin 100 % ja vuoroin 0 %, tarkoittaen LEDin käyttötunnin ottavan todellisuudessa vain 0,5 tuntia. Kanttiaallon taajuus on kuitenkin hyvin korkea >100kHz eli ihmissilmä ei pysty erottamaan valon välkyntää. Pulssileveysmoduloinnilla voidaan ohjata myös RGB-LEDien väriskaalaa, jolloin väri-LEDeille syötetään oma ohjaus-signaali. Muuttamalla näiden pulssisuhdetta aikaansaadaan eriväri t.

LEDin valovoimakkuutta voidaan säätää myös jatkuvalla virran säädöllä (CCR, Constant Current Reduction), jossa LEDin päästösuuntaista virtaa säädetään lineaarisesti. Säätöalue on 10–100 %. Taulukkoon 13 on kerätty LEDin hyviä ja huonoja ominaisuuksia.

TAULUKKO 13. LEDin ominaisuuksia.

VAHVUUDET	HEIKKOUDET
• pitkä käyttöikä • hyvä säädettävyys ja nopea säätövaste esim. syttyy heti • valontuotto kylmässä • ei tuota UV-säteilyä • iskunkestävyys • värin tuotto mahdollisuudet ilman suotimia • pieni koko	• herkkä ylivirralle ja estosuuntaiselle jännitteelle -> tuhoutuu • voimakas lämpeneminen, joka kiihtyy lämpötilan noustessa • jäähdytyselementin koko • valonlähteen vaihtaminen eliniän lopussa • voimakas häikäisy

4.3. Valonlähteiden sähköiset ominaisuudet

Energiatehokkuus on tärkeä osa valaistuksen uudistusta kiinteistössä. Valaistuksen sähkönkulutus ja siitä saatavat säästöt ovat alkaneet puhuttaa yhä enemmän etenkin suurten tehdashallien ja myymälöiden kohdalla. Suurten valaistuskuormien kanssa tulee kuitenkin huomioida tehon eri komponentit, jotta saadaan selville todellinen sähkönkulutus.

Näennäisteho, S (VA): vaihtovirtaa käyttävän laitteen verkosta ottama sähköinen teho.

Pätöteho, P (W): verkosta otetun vaihtovirran osa, joka saadaan muutettua työksi esim. valoksi.

Loisteho, Q (Var): ei ole työtä tekevää tehoa. Se värähtelee edestakaisin kuorman ja siirtoverkon välillä ja kuormittaa siirtojohtoja synnyttämänsä virran ansiosta. Se voi olla induktiivista tai kapasitiivista riippuen kuormalaitteiden rakenteesta. Mikäli epäsymmetrisiä kuormia on samassa suhteessa kytkettynä verkkoon ne kumoavat toisensa ja saavutetaan optimi siirtokyky tehokertoimen ollessa lähellä arvoa 1.

4.3.1 Tehokerroin PF (Power Factory)

Valaisimien tuoteselosteissa puhutaan tehokertoimesta PF, jota käytetään myös virtapiirien hyötysuhteen ilmoittamisessa. Valaisimella PF kuvaa sen verkosta ottaman tehon laatua ja miltä sen kuorman kytkeminen verkkoon päin näyttää. Tehokertoimen avulla voidaan päätellä myös, kuinka suuriosa näennäistehosta muuttuu valaisimessa valoksi ja, kuinka paljon jää loistehona siirtoverkkoon. Luku kuvaa pätötehon (P) ja näennäistehon (S) välistä suhdetta. Voidaan puhua myös COS φ:stä, joka kertoo vaihekulman virran ja jännitteen välillä. Tehokeroin saa arvoja 0 ja 1 välillä. Se voi olla lisäksi, joko induktiivista (jäljessä, osoittaen tehokolmiossa ylös) tai kapasitiivista (edellä, osoittaen alas). Sen arvo pyritään pitämään valaisimelle lähellä ideaalia eli 1, jolloin verkkoon ei tuoteta vääristymää ja laitteen pätöteho ja näennäistehoa ovat yhtä suuret. Aivan arvoa 1 sähkölaitteen tehokerroin ei kuitenkaan kykene saavuttamaan. Jos valaisin tuottaa induktiivista kuormaa PF:n ollessa 0.7, kapasitiivisia kondensaattoreita on kytkettävä kunnes, PF on 1. Kun virta ja jännite ovat samassa vaiheessa PF on yksi (cos(0°)=1). Tällöin virtapiiri tai valaisin on täysin resistiivinen, joka mahdollistaa pienimmän häviön ja parhaan tehonsiirron.

4.3.2 Harmoniset yliaallot

Sähkönkulutuksen kasvaessa jatkuvasti, sen mukana lisääntyvät myös laitteet, jotka toimiessaan tuottavat häiriöitä sähköverkkoon. Yliaalloista puhutaan ilmiön kanssa, joka huonontaa sähkön laatua merkittävästi. Koska sähkölaitteet on suunniteltu toimimaan puhtaalla sinimuotoisella jännitteellä, syntyy ongelmia kun sähkön jakeluverkkoon kytketään virtapiiri, joka koostuu virran ja jännitteen suhteen epälineaarisista kuormista. Yliaallot ovat verkon säröjä ja virtamuodon vääristymiä, jotka aiheuttavat kiertovirtoja, korkeita magneettikenttiä ja toiminta häiriötä herkissä sähkölaiteissa. Loiste- ja purkauslamppujen liitäntälaitteet ovat epälineaarisia kuormia ja ne tarvitsevat erillisen virranrajoittimen. Perinteisenä virranrajoittimena esimerkiksi loistevalaisimissa on toiminut magneettinen kuristin, joka nykyään voidaan korvata elektronisella kuristimella. Kun valaisimen tehokerroin jää alhaiseksi, sitä voidaan parantaa rinnakkaiskompensoinnilla. Uudet elektroniset liitäntälaitteet parantavat hyötysuhdetta ja valonlaatua, mutta synnyttävät harmonisia yliaaltoja, sillä niiden toiminta perustuu verkkojännitteen vaihtosuuntaamiseen suurella taajuudella (>20 kHz). Syntyneet yliaallot eivät yleensä

ole ongelma niiden aiheuttajille, mutta ne leviävät verkkoon muille käyttäjille ja summautuvat aiheuttaen harmia myille käyttäjille. Laitteissa on alettu vaatia yliaaltosuodatinta, joka minimoi verkkoon pääsevän häiriön ja suodattaa häiriötaajuudet hyvin tehokkaasti. Standardilla IEC 555-2 säädetään ja asetetaan rajat valaisinvalmistajien yliaaltopäästöille. Ohjearvo THD (Total Harmonic Distortion) kertoo yliaaltojen kokonaismäärän. Tietokoneilla THD on noin 80 %, valaisimilla noin 20 % ja elektronisilla liitäntälaitteilla 10 %

(Yliaalto-opus, Leena Korpinen, Marko Mikkola, Tommi Keikko, Emil Falck)

5 VALAISTUKSEN ENERGIATEHOKKUUS

Valaistus on kiinteistöjen energiankulutuksessa huomionarvoinen osa. Yli 60 % Euroopan valaistuksesta on toteutettu vanhalla ja hyötysuhteiltaan energiaa tuhlaavalla tekniikalla. Ilmaston lämpeneminen ja sen ympäristövaikutukset ovat saaneet energiankulutuksen ja siitä koituvat hiilidioksidipäästöt suurennuslasin alle. Energiapalveludirektiivin (ESD) ja kansallisten toimenpidesuunnitelmien tavoitteena on aikaansaada 9 % säästöt seuraavan yhdeksän vuoden kuluessa. Taulukossa 14 on esitetty arvio tämän hetken energiansäästöpotentiaalista Suomessa. (Suomen valoteknillinen seura ry, Energiatehokas valaistus esitys)

TAULUKKO 14. Arvio vuoden 2013 energiankulutuksen säästöpotentiaalista. (Suomen valoteknillinen seura, www.valosto.fi)

ALUE	Kulutus TWh/a	Säästö potentiaali TWh/a	%	Lähde
Kotivalaistus	1,6	1,0	62	Motiva
Palvelu- ja julkinen valaistus	4,0	1,2	30	Motiva
Teollisuusvalaistus	1,5	0,4	26	Ruotsin teollisuus
Katuvalaistus	0,9	0,2	22	Kuntaliitto, tilastokeskus
YHTEENSÄ	**8,0 GWh/a**	**2,8 TWh/a**	**30**	

Energiatehokkuus tarkoittaa, että standardin määrittämät valaistusvaatimukset täytetään mahdollisimman energiataloudellisilla ratkaisuilla ilman, että näkömukavuudesta joudutaan tinkimään. Kuviossa 64 on esitetty energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät.

KUVIO 64.Valaistuksen energiatehokkuus tekijät (SVS 2008, 24)

Suunnittelussa tulee huomioida valonlähteen energiatehokkuus, valaisimen hyötysuhde, liitäntälaitteen tekniikka ja siitä koituvat tehohäviöt ja valaistuksen ohjaus läsnäolotunnistuksella sekä päivänvalon mukaan.

5.1. Valaisinten huoltokerroin

Valaisimen huoltokertoimeen vaikuttavia tekijöitä ovat lampun eloonjäämiskerroin, huoneen pintojen likaantumiskerroin sekä lampun valovirran alenema. Huoltokertoimen avulla voidaan arvioida valaistukselle koituvia kunnossapitokustannuksia. Mitä pienempi huoltokerroin on välillä 0-1, sitä suuremmat ovat kunnossapitokustannukset.
(Glamox Luxo Lighting Oy, http://glamox.com/fi/ledien-elinik1)

5.2. Valovirran alenema

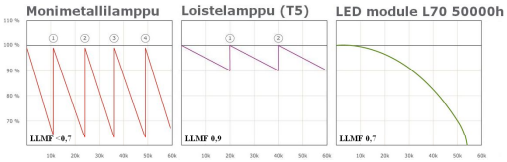
Valonlähteen valovirran aleneminen vaikuttaa myös oleellisesti energiatehokkuuteen. Valonlähdettä valittaessa alenemakertoimen nousu LLMF 0,7:stä 0,8:saan vähentää energian kulutusta noin 12,5 %. Valonlähteiden valovirran alenema on prosenttiluku välillä 0-1, joka kertoo kuinka paljon alkuperäisestä valovirrasta on jäljellä, kun valonlähde tulisi vaihtaa. Hyötypolttoikä määritellään siten, että ilmoitetaan se aika tunteina, jona valovirta laskee tähän ohjearvoon. Valonlähteen ei siis tarvitse sammua, jotta sen vaihto olisi ajankohtainen. Kuviossa 65 on esitetty valaistussuunnittelussa käyttäviä ohjearvoja eri valonlähteiden sallituille valovirran alenemille sekä eri tilojen likaantumiskertoimia.

Valonlähteen valovirranalenema	
T5-loistelamput	0,90
T5C-rengasloistelamput	0,80
T8-loistelamput	0,90
Pienloistelamput	0,80–0,90
Monimetalli (keraaminen)	0,85
Monimetalli (kvartsi)	0,80
Induktiolamput	0,70
Suurpainenatriumlamput	0,90
Elohopealamput	0,70
Halogeenilamput	1,00
Hehkulamput	0,95
LED	0,70

Likaantumisen vaikutus	
Tilan kuvaus	Alenema
Puhdas	0,85
• toimisto	
• sairaala	
• laboratorio	
Keskimääräinen	0,75
• luokkahuone	
• myymälä	
• julkiset tilat	
Likainen	0,60
• teollisuustila	
• varasto	

KUVIO 65. Ohjeelliset laskentataulukot valovirran alenemalle sekä likaantumisen vaikutukselle. (Indoor lighting solutions, Fagerhult Oy 2012-2013)

Kuviossa 66 on esitetty valonlähteiden vaihtoväliä suhteessa valovirran alenemaan. Monimetallilampun alkuperäisestä valovirrasta on jäljellä 66 % 12 000 tunnin käytön jälkeen. Se joudutaan vaihtamaan kolme kertaa LED-moduulin 50 000 tunnin elinkaaren aikana, eli neljällä lampulla saavutetaan yhden LED-moduulin käyttöikä. T5-loistelampun alkuperäisestä valovirrasta on jäljellä 90 % 20 000 tunnin käytön jälkeen. Loistelamppuja vaaditaan kaksi ja puoli, jotta 50 000 tunnin käyttöikä saavutetaan.



KUVIO 66. Valonlähteiden valovirran pysyvyys. (Glamox Luxo Lighting Oy, http://glamox.com/fi/ledien-elinik1)

Sisävalaistus standardissa SFS-EN 12464-1-2011 mainitaan, että valovirran alenema tulee huomioida valaistussuunnittelussa. Tilaan lasketut valaistusvoimakkuuden on mitoitettava ohjeellisten alenema kertoimien perusteella, koska valonlähteet menettävät valovirtaansa ikääntyessään sekä likaantuvat tilasta riippuen. Myös huoltotoimenpiteistä tulisi suurissa kiinteistöissä laatia valaistuksen huoltosuunnitelma, jossa määritettäisiin etukäteen valaisimien, seinä- ja kattopintojen puhdistus sekä lamppujen ja tärkeimpien kulutusosien (sytyttimien, kuristimien ja liitäntälaitteiden) vaihtoajankohta. Näillä toimenpiteillä mahdollistetaan tasaiset valaistusolosuhteet koko valaisimen elinkaaren ajan. Toimenpiteet tulisi suorittaa kootusti kaikille tilan valaistukselle, jottei valonsävy- tai teho eroja syntyisi valaisinten välillä.

5.3. LENI-indeksi

Rakennuksen energiatehokkuuden määrittämiseen ja valaistuksen sähkönkulutukseen voidaan pureutua LENI (Lighting Energy Numeric Indicator)-indeksin avulla. LENI-indeksi määritellään standardissa EN 15193 (Energy Performance of Buildings - Energy Requirements for Lighting), joka käsittelee kiinteän valaistuksen energian kulutusta erilaisissa rakennuksissa. LENI-indeksi ilmoitetaan muodossa kWh/m^2/vuosi. Koska

LENI-luku lasketaan koko rakennukselle, voidaan sen arvoa käyttää hyväksi rakennusten välisessä vertailussa. (www.fagerhult.fi)

Standardista (EN 15193) löytyy kaksi menetelmää LENI-luvun määritykseen. Ohjeet valaistuksen energiankulutuksen mittaukseen, jolla lasketut tulokset voidaan tarkastaa. LENI-indeksi voidaan laskea yksinkertaisimmillaan kaavalla 1.

$$\text{LENI} = \frac{\text{valaistuksen kokonaiskulutus vuodessa}}{\text{rakennuksen valaistujentilojen pinta–ala}} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}\right) \text{vuodessa} \qquad (1)$$

esimerkiksi urheiluhallin LENI-indeksi:

$$LENI = \frac{\text{käyttötunnit vuodessa} \cdot \text{valaistuksen kokonaiskuorma}}{\text{rakennuksen valaistujentilojen pinta} - \text{ala}}$$

urheiluhallin valaistuksen normaalikäytölle käsiohjauksella valitaan standardiarvo 4000 tuntia vuodessa (SFS-EN12193, luokka 2, 500 luksia pelialueella), valonlähde 50·250W monimetallipurkauslamppu:

$$LENI = \frac{4000\ h \cdot 12{,}5\ kW}{1000 m^2} = \frac{50\ 000\ \text{kWh}}{1000 m^2} = 50 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}\right) \text{vuodessa}$$

Kuten taulukosta 15 voidaan huomata, LENI-indeksin arvo 50 vastaa urheiluhallille energiankäyttö-luokkaa 3. Rakennusmääräys kokoelmassa D5 (RakMK D5) esitetään ominaiskulutusarvoja rakennuksille. Energiankäyttöluokka 3 täyttää D5:n energiatehokkuusvaatimukset, mutta valaistuksen tulee muilta osin noudattaa voimassa olevia sisävalaistuksen standardeja ja suosituksia (EN 12464-1-2011). Pelkästään energiatehokkailla valonlähteillä on mahdollista saavuttaa käyttöluokka 3. Kun valaistuksen energiatehokkuutta halutaan parantaa edelleen, otetaan käyttöön läsnäolo- tai vakiovalo-ohjausta.

TAULUKKO 15. LENI-luvut ja energiankäyttöarvot rakennukselle. (Fagerhult Oy, PDF-esitteet, VBE- ja AQ –indeksi)

Tila	LENI-luku (kWh/m²/vuosi)				
Käytävät	≤10	10–15	15–20	20–25	>25
Luokkahuoneet	≤15	15–20	20–25	25–30	>30
Toimistot	≤10	10–20	20–30	30–40	>40
Aulat	≤15	15–25	25–35	35–45	>45
Kokoustilat	≤15	15–30	30–40	40–50	>50
Urheiluhallit	≤40	40–50	50–60	60–70	>70
Teollisuustilat	≤40	40–60	60–80	80–100	>100
Tavaratalot	≤75	75–100	100–125	125–150	>150
Marketit	≤75	75–100	100–125	125–150	>150
Energiankäyttö	**5**	**4**	**3**	**2**	**1**

Energiankäyttö 5 *– Energiatehokkaasti toteutettu valaistusjärjestelmä, jossa valaistus on paikallistettu, siinä käytetään energiatehokkaita valonlähteitä sekä päivämvalo- ja läsnäolo-ohjausta.*

Energiankäyttö 4 *– Energiatehokkaasti toteutettu valaistusjärjestelmä, jossa valaistus on tyypillisesti paikallistettu, siinä käytetään energiatehokkaita valonlähteitä sekä normaalia ohjausta.*

Energiankäyttö 3 *– Nykyaikainen valaistusjärjestelmä, jossa ei ole erityisesti pyritty energiatehokkuuteen.*

Energiankäyttö 2 *– Tehokkuudeltaan heikohko valaistusjärjestelmä.*

Energiankäyttö 1 *– Tehokkuudeltaan heikko valaistusjärjestelmä. Tyypillinen 70-luvun valaistusratkaisu C-luokan kuristimella.*

5.4. EuP-direktiivi

EUP (Energy Using Products)-direktiivi tuli Suomessa voimaan vuonna 2008. Sen tarkoituksena on asettaa rajoituksia EU-alueella sähkölaitteiden energiankulutukselle ja poistaa markkinoilta vanhentuvaa tekniikkaa, jonka hyötysuhde on heikko. EuP-direktiivin tulevaisuuden näkymiä:

Vaihe 2 – kolme vuotta voimaanastumisen jälkeen (2012).

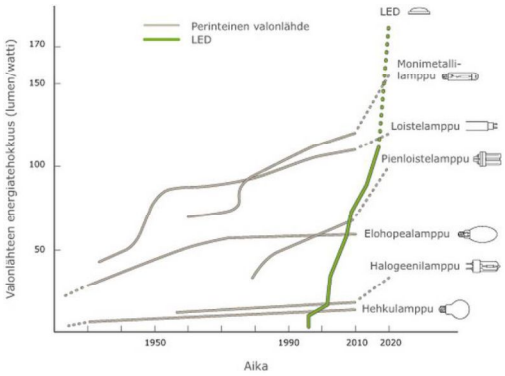
- T10- ja T12-halofosfaattiloistelamput, valotehokkuudeltaan heikoimmat suurpainenatrium- ja monimetallilamput poistetaan myynnistä vähitellen. (kannat E27, E40 ja PGZ12).
- Vuonna 2015 myynnistä poistetaan myös elohopealamput.
- Suurpainepurkauslamppujen liitäntälaitteiden minimitehovaatimusten esittely. Lisäksi otetaan käyttöön pakollinen EEI-merkintä (energiatehokkuusindeksi) kaikissa liitäntälaitteissa. Loistelamppujen liitäntälaitteiden valmiustilatehon tulee olla alle 0,5 W.
- Sisäänrakennetuilla liitäntälaiteilla varustettujen valaisinten tulee olla yhteensopivia kolmannen vaiheen liitäntälaitevaatimusten kanssa lukuun ottamatta valaisimia, joiden kotelointiluokka on vähintään IP 4X. Kaikkien valaisinten pakollisten tuotetietojen tulee löytyä Internetistä ja tuotedokumentaatiosta. Valaisimia koskevat lisäksi samat valmiustilarajoitukset kuin liitäntälaitteita.

Vaihe 3 – määritellään kahdeksan vuotta voimaanastumisen jälkeen (2017).

- Suurin osa monimetallilampuista ja 2-nastaiset pienoisloistelamput poistetaan myynnistä vähitellen (≥ 405 W, kannat E27, E40 ja PGZ12).
- B1-, B2- ja A3-luokan liitäntälaitteet poistetaan myynnistä vähitellen. Lisaksi liitäntälaitetehokkuudelle asetetaan vaatimuksia valonlahteen tehon mukaan.
- Kaikkien liitäntälaitteen sisältävien valaisinten tulee täyttää liitäntälaitteiden kolmannen vaiheen vaatimukset.

(Fagerhult Oy, Indoor lighting solutions 2012-2013)

Kuviossa 67 on esitetty valonlähteet hyötysuhteiden mukaisessa järjestyksessä.



KUVIO 67. Valonlähteiden valotehokkuus (www.osram.fi)

Energiatehokkuusindeksi (EEI) on luokitusjärjestelmä, jonka mukaisesti ilman sisäistä virranrajoitinta valmistettujen valonlähteiden virranrajoittimet luokitellaan hyötysuhteen raja-arvojen perusteella. Himmennyskäyttöön soveltumattomien virranrajoitinten luokat ovat (hyötysuhteen mukaan alenevassa järjestyksessä) A2 BAT, A2, A3, B1 ja B2 ja himmennyskäyttöön soveltuvien virranrajoitinten luokat A1 BAT ja A1.

Kaasupurkaus valaisimille hyötysuhteen arviointiin voidaan käyttää liitäntälaitteen valmistajan ilmoittamia tietoja. Kaikkien valaisinten pakollisten tuotetietojen tulee löytyä Internetistä ja tuotedokumentaatiosta. (EuP-direktiivin vaihe 2)
(www.valosto.fi)

5.5. Ympäristödirektiivit RoHS ja WEEE

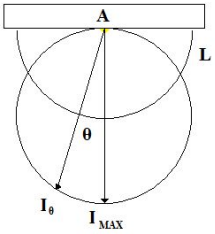
Ympäristölle ja terveydelle haitallisten aineiden käyttöä sähkölaitteissa rajoittaa RoHS-direktiivi, joka astui voimaan 1.7.2006. Direktiivi rajoittaa sen piirissä olevien tuotteiden pitoisuusrajoituksia seuraavien aineiden kohdalla: lyijy, elohopea, kadmium, kuu-

denarvoinen kromi, polybromattu bifenyylieetteri (PBB), polybromattu difenyylieetteri (PBDE). Direktiivi koskee samoja tuoteryhmiä, kuin WEEE-direktiivi (sähkö- ja elektroniikkalaiteromu), lukuunottamatta terveydenhuollon laitteita sekä tarkkailu- ja valvontalaitteita. hehkulankalamput kuuluvat direktiivin piiriin.
(http://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/ymparisto/fi_FI/RoHS-direktiivi/)

6 VALAISTUSVOIMAKKUUDEN LASKEMINEN PINTAKIRKKAUDEN AVULLA

Yksi työn tavoitteista on selvittää, kuinka valaisimen pintakirkkauden eli luminanssin avulla voidaan laskea valaistusvoimakkuus eri etäisyyksillä valonlähteestä ja kuinka valaisimen ja pinnan välinen kulma vaikuttaa laskentaan. Kaavoja tarvitaan mm. LED-valaisinten tuotekehityksessä ja uusien optisten materiaalien testauksessa.

Tarkasteltaessa valonlähdettä, jonka tuottama säteily jakautuu tasaisesti valonlähteen ympärille niin, että pinnan luminanssi on kaikkiin säteily kulmiin sama, voidaan laskennassa soveltaa Lambertin lakia ja kosinilakia. Lambertin laki pätee tilanteessa, jossa tarkasteltava pinta on täysin hajaheijastava tai hajasäteilevä eli pinnan valovoima on suurin pinnan normaalin suunnassa ja pienenee kosisi lain mukaisesti säteilykulman poiketessa pinnan normaalin suunnasta. Kuviossa 68 on esitetty, kuinka valo säteilee pistemäisestä valonlähteestä.



KUVIO 68. Pinnan luminanssi ja valovoimakkuus (Valaistustekniikka, Halonen, Lehtovaara)

Valaisimen pinnan luminanssi voidaan ratkaista yhtälöstä 6.1.

$$L = \frac{I_{MAX}}{A} \tag{6.1}$$

Kun pinnan luminanssia tarkastellaan kulmassa θ, voidaan se ratkaista yhtälöstä 6.2.

$$L_\theta = \frac{I_\theta}{A \cdot \cos\theta} \tag{6.2}$$

L = pinnan luminanssi (cd/m^2)
A = valaisimen pinta-ala (m^2)
I_{MAX} = normaalin mukainen maksimi valovoima (cd)
L_θ = luminanssi kulmassa θ (cd/m^2)
I_θ = valovoima kulmassa θ (cd)
cosθ = luminanssin mittauskulma valaisimen horisontaalista (°)

Täysin heijastavan pinnan valovoima suuntaan θ saadaan laskettua Lambertin lain mukaan yhtälöiden 6.3 ja 6.4 avulla.

$$I_\theta = I_{MAX} \cdot \cos\theta \tag{6.3}$$

tai

$$I_\theta = L \cdot A \cdot \cos\theta \tag{6.4}$$

Täysin hajasäteilevän tasopinnan maksimivalovoima voidaan laskea yhtälöllä 6.5

$$I_{MAX} = \frac{\phi}{2\pi \cdot sr} \tag{6.5}$$

Φ = valovirta (lm)

Pistemäisen valonlähteen, kuten LED (X) säteillessä valoa kohtisuoraan tarkasteltavaa tasoa vasten voidaan työkaluna käyttää neliölakia. Sen mukaan valaistusvoimakkuuden laskiessa kääntäen verrannollisesti etäisyyden neliöön, valaistusvoimakkuudelle käytetään yhtälöä 6.6

$$E = \frac{I}{r^2} \cdot \omega \tag{6.6}$$

E = valaistusvoimakkuus (lx)
I = valovoima (cd)
r = valaisimen säde (m)
ω = avaruuskulma (sr)

Tilanteessa, jossa määritetään valaistusvoimakkuus etäisyydellä X valaisimen luminanssin L (cd/m^2) avulla, voidaan se muuntaa valovoimaksi Lambertin lakia soveltamalla. Testi tilanteessa mittaukset suoritettiin LED-paneelille, joka koko oli 600mm x 600mm. Kohtisuoraan paneelin alta kahdenmetrin etäisyydeltä mitatut arvot ovat L=4737 cd/m^2 ja E=275 lx

$$I = AL \tag{6.7}$$

Valovoiman yhtälö 6.7 voidaan sijoittaa neliölain yhtälöön 6.6.

$$E = \frac{I}{r^2} \cdot \omega = \frac{A \cdot L}{r^2} \cdot \omega$$

$$E = \frac{0{,}36m^2 \cdot 4737cd/m^2}{(2m)^2} \cdot sr$$

Kun luminanssia tarkastellaan kulmassa, neliölakia ei voida hyödyntää valaistusvoimakkuuden laskennassa. Tällöin laskennassa käytetään koninilakia, jonka vulla voidaan määrittää horisontaalivalaistusvoimakkuus E_h. LED-paneelille mitatut arvot ovat kahden metrin etäisyydeltä, 45 asteen kulmassa: L= 4574 cd/m^2 ja E_h=275 lx. Valaistus voimakkuus 2 metrin etäisyydellä voidaan laskea luminanssin avulla kaavalla 6.8.

$$E_h = \frac{I}{r^2} \cdot cos\alpha \tag{6.8}$$

$$E_h = \frac{A \cdot L}{r^2} \cdot cos\alpha$$

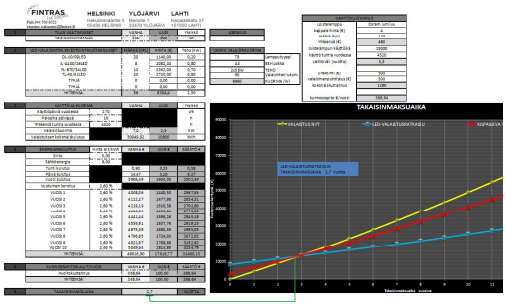
$$E_h = \frac{0{,}36m^2 \cdot 4574\ cd/m^2}{(2m)^2} \cdot \cos(110°)$$

$$E_h = 291{,}1\ lx$$

7 LED-VALAISTUSRATKAISUN TAKAISIMAKSUTYÖKALU

LED-valaistusratkaisujen korkea hankintahinta on yleisesti kynnyskysymys valaistuksen uudistamishankkeen toteuttamisessa. Suurten tilojen valaistusratkaisuissa käytettävät LED-heittimet ja -syväsäteilijät ovat kaasupurkaus vaihtoehtoihin verraten arvokkaampia, mutta huoltovapaus, pitkä käyttöikä ja energiatehokkuus tuovat säästöjä, joiden vaikutus takaisinmaksuaikaan on merkittävä. Jotta investoinnin kannattavuus voidaan havainnollistaa asiakaskäynnillä yksiselitteisesti, on takaisinmaksuaikaa laskeva työkalu siihen mainio keino. Tässä luvussa on esitelty tämän opinnäytetyön yhtenä osana Fintras Oy:lle kehitettyä takaisimaksutyökalua. Taulukossa 16 on havainnollistettu laskentatyökalun käyttöliittymää.

TAULUKKO 16. Kuvakaappaus takaisinmaksutyökalun käyttöliittymästä



7.1. Takaisinmaksutyökalun tarvemäärittely

LED-valaistusratkaisun suunnittelu toteutetaan ennen takaisinmaksuajan laskentaa. Suunnitelman pohjalta saadaan käytettävät valaisintyypit ja määrät. Takaisinmaksutyökalun tarkoitus on huomioida olemassa oleva valaistus ja siitä koituvat vuosittaiset ylläpitokustannukset sekä haluttu valaistusvoimakkuuden taso eri tiloissa. Valmiin tarjouksen yhteydessä voidaan määrittää LED-valaistusratkaisun takaisinmaksuaika.

Laskentatyökalulta toivottiin yksinkertaisuutta ja siistiä ulkoasua. Laskennassa tulisi näyttää vain tärkeimmät osa-alueet, jotta informaatiotulva ei häiritsisi olennaista. Taulukon tulisi olla tulostettava dynaaminen esitys sovituista asioista, joita ovat:

- uudistuksesta saatava valaistusvoimakkuuden korotus
- käytettävät valaisimet, niiden määrät ja hankintahinnat
- asennuksesta ja kaapeloinnista koituvat kustannukset
- käyttöaika päivässä, kuukaudessa ja vuodessa
- valaisinkuorma nyt ja uudistuksen jälkeen
- energiankulutus nyt ja uudistuksen jälkeen
- ylläpitokustannukset nyt ja uudistuksen jälkeen
- uudistuksesta saatavat vuotuiset säästöt
- tarkasteltava aikaväli
- takaisinmaksuaika kuukausina ja sen graafinen esitys
- sähkön- ja siirron hinnan vuotuinen muutos ja sen vaikutus saatavaan säästöön
- kilpailevan valaistusratkaisun takaisinmaksuaika verrattuna LED-valaistusratkaisuun

7.2. Takaisinmaksutyökalun toteutus

Takaisinmaksutyökalua lähdettiin toteuttamaan laskentataulukoksi, joka on myöhemmin mahdollista koodata omaksi ohjelmaksi. Alustaksi työkalulle valittiin Microsoft Excel-taulukkolaskenta sen tunnettuuden ja helppokäyttöisyyden vuoksi. Alustavassa suunnittelussa laskentalogiikasta piirrettiin ”prosessikaavio”, josta löytyi laskentaan tarvittavat muuttujat, niiden väliset riippuvuudet sekä muut laskentaan vaikuttavat tekijät, kuten sähkön hinnan muutos. Kaaviossa oli helppoa seurata kokonaisuutta ja valita asiakkaan kannalta oleelliset laskennan vaiheet. Työkalun tavoite oli pitää käyttöliittymä mahdollisimman yksinkertaisena, jotta asiakkaalle ei esitetä ns. ”ylimääräistä” laskentadataa.

Laskentaan haluttiin sisällyttää mahdollisuus valita valaistusratkaisussa käytettävät valaisimet kätevästi pudotusvalikoista, niitä kuvaavien kategorioiden alta. Lisäksi pudotusvalikoista avautuvien tuoteluetteloiden päivitys ja muokkaus tulisi olla helppoa ja nopeaa. Excel-taulukkolaskennan ominaisuutena ovat välilehdet, joille voidaan taulukoida arvoja esimerkiksi ”tuoteluettelo”-välilehdelle, valaisinten yksikköhinnat, tehot, tehokertoimet, hyötysuhteet, tuotenumerot jne. Käyttämällä P-haku-toimintoa voidaan välilehdiltä poimia käyttöliittymässä valittujen tuotteiden tiedot ja hyödyntää niitä edelleen laskennassa. Soluihin on mahdollista lisätä kommentteja, joiden avulla käyttö on helppo opetella ja omaksua.

Työkalu ei huomioi valonlähteiden hyötysuhdetta, eikä liitäntälaitteiden ja virtalähteiden tehohäviöitä. Nämä tekijät tulisi huomioida jo varsinaisen valaistussuunnittelun, yhteydessä, mutta toiveissa on kehittää laskentatyökalua huomioimaan myös nämä ominaisuudet tulevaisuudessa. Lisäksi ohjauksen vaikutusta energiankulutukseen ja valonlähteen käyttöikään tullaan lisäämään työkaluun.

7.3. Takaisinmaksutyökalun käyttöesimerkki

Tässä käyttöesimerkissä verrataan takaisinmaksutyökalun avulla valaistussuunnitelman mukaista LED-valaistusratkaisua tilassa käytössä olevaan valaistukseen. Laskenta toteutetaan arvioimalla elinkaarikustannuksia valaistusratkaisuille, joiden pohjalta voidaan määrittää uudistuksen takaisinmaksuaika. Graafisessa esityksessä on mahdollista lisätä tarkasteluun mahdollinen kilpaileva valaistusratkaisu, jolla voidaan todentaa kuvaajien avulla tilan kannalta edullisin vaihtoehto.

7.3.1 Tilan vaatimukset

Takaisinmaksutyökalun ensimmäisessä vaiheessa asetetaan tilassa mitattu valaistusvoimakkuus vanhalle valaistukselle ja valitaan haluttu valaistusvoimakkuus uudelle valaistusratkaisulle. Valaistusvoimakkuudet halutaan esittää asiakkaalle, jotta valotason nousu olisi lomakkeessa selkeästi esillä. Tämä on asiakkaalle yksi looginen syy sijoittaa uuteen valaistusratkaisuun, koska uusi LEDeillä toteutettu valaistus parantaa työskentely olosuhteita. Taulukossa 17 on esitetty valaistusvoimakkuuden määrittely. Syötettäviin arvoihin ei sisälly laskentalogiikkaa.

TAULUKKO 17. Valaistusvoimakkuuden määrittely

1	TILAN VAATIMUKSET	VANHA	UUSI	Yksikkö
	Valaistusvoimakkuus	300	500	lux

7.3.2 LED-valaisinten investointikustannukset

Kohdassa valitaan valaistussuunnitelman mukaiset valaisimet sekä määritellään, kuinka monta kyseistä valaisinta halutaan käyttää. Työkalussa on mahdollista valita kuusi eri

valaisinmallia. Valaisinkentässä aukeaa pudotusvalikko, johon päivittyvät kaikki ”tuoteluettelo”-välilehdelle listatut LED-valaisimet kategorioineen. Taulukossa 18 on esitetty pudotusvalikon näkymä, josta voi nopeasti selata suunnitelmassa esitetyn valaisimen mallin. Tuote- ja sähkönumerolla, valaisin täytyy etsiä suoraan tuotevälilehdeltä ja kopioidan malli käyttöliittymään.

TAULUKKO 18. Valaisimien valinta ja asennuskustannusten määrittely

2	LED-VALAISTUKSEN INVESTOINTIMENOT	MÄÄRÄ (KPL)	HINTA (€)	Teho (kW)
	DL-10/09LED	20	1140,00	0,20
	LED-ALASVALOT	8	2082,40	0,80
	DL-07/42LED GU10	10	2362,00	0,70
	DL-10/09LED	20	2720,00	0,80
	DL-10/03LED	0	0,00	0,00
	DL-10/04LED	0	0,00	0,00
	DL-10/05LED	0	0,00	0,00
	DL-10/06LED			
	YHTEENSÄ:	58	8304,4	2,50

ASENNUS

Valaistusratkaisu toteutetaan seuraavilla valaisimilla:

- 20kpl 10W LED-alasvaloja
- 8kpl 100W LED-syväsäteilijää
- 10kpl 70W LED-heittimiä
- 20kpl 40W LED-kiskovalaisimia

Kun valonlähteet ja kappalemäärät on valittu, työkalu täyttää automaattisesti ”tuoteluettelo”-välilehdeltä löytyvät yksikköhinnat ja valaisintehot, sekä laskee yhteen koko investointikustannuksen ja sähköisen valaisinkuorman LED-valaistusratkaisulle.

Asennuksesta voidaan sopia asiakkaan kanssa tässä vaiheessa ja huomioida siitä koituvat kustannukset myös valaistusratkaisun takaisinmaksuajassa. Asennuskustannukselle on taulukossa 18 näkyvä kenttä, johon syötetään kertakustannus asennusurakasta. Laskentatyökalu summaa asennuskustannukset investointikustannuksiin, jolloin niiden vaikutus näkyy myös elinkaarikustannuksissa ja takaisinmaksuajassa. Käyttöesimerkissä asennus teetetään kolmannella osapuolella, joten siitä koituvia kustannuksia ei huomioida takaisinmaksuajassa.

7.3.3 Käyttö ja kuorma

Kohdassa määritellään energiankulutus valaistusratkaisuille. Ensin rajataan valaistuksen käyttöjaksot. Käyttötuntimäärä voidaan arvioida esimerkiksi valaistusstandardin SFS-EN12193 mukaisten tilasuositusten mukaisesti, tässä esimerkiksi urheiluhalli 4000 tuntia/vuosi. Esimerkissä käyttöpäiviä on 270 vrk/vuosi, joina valot palavat aikaohjauksella 16 tuntia päivässä. Taulukossa 19 on esitetty käyttöaikojen ja energiankulutuksen määrittely.

TAULUKKO 19. Käytön ja energiankulutuksen kartoitus

3	KÄYTTÖ JA KUORMA		VANHA	UUSI	Yksikkö
	Käyttöpäiviä vuodessa	270			vrk
	Paloaika päivässä	16			h
	Yhteensä tuntia vuodessa	4320			h
	Valaisinkuorma		7,0	2,5	kW
	Valaistuksen kokonaiskulutus		30049,92	10800	kWh

Vanhan valaistusratkaisun energiankulutus voidaan määritellä suoraan työkaluun, mikäli se on tiedossa. Asiakkaat harvemmin osaavat kuitenkaan tätä kertoa, koska valaistuksen energiankulutusta mitataan vielä hyvin harvoin. Vanha valaisinkuorma voidaan syöttää käsin, jolloin työkalu laskee valittujen käyttöaikojen mukaan energiankulutuksen. LED-valaistusratkaisun energiankulutus täydentyy automaattisesti käyttöajan ja työkalun laskelman kokonaistehon tulona.

Vanhan valaistusratkaisun kuorma arvioidaan laskennallisesti. Esimerkiksi vanhan T8-loistevalaisin kuorman arviointi voidaan suorittaa, valaisinten määrän ja yksikkötehojen perusteella, kuten taulukossa 20 on laskettu.

TAULUKKO 20. Valaistuskuorman arviointi.

VANHA VALAISINKUORMA	
T8	Lampputyyppi
A3	EEI-luokka
2x58W	TEHO
60	Valaisinten lukum.
6960	KUORMA (W)

Vanhan valaistusratkaisun hyötysuhdetta voidaan arvioida liitäntälaitteen energiatehokkuusluokan avulla. ”EEI-arvot”-välilehdeltä löytyvät eri loistevalaisimien kuristimien ja liitäntälaitteiden EEI-luokat ja niitä vastaavat hyötysuhteet.

7.3.4 Energiankulutus

”Energiankulutus”-kohdassa muutetaan sähkönkulutus euroiksi. Välilehdellä ”sähkön- ja siirron hintoja” on taulukoitu tilastoja erityyppisille rakennuksille, joista voidaan arvioida hinnat jos tarkkaa arvoa ei ole tiedossa. Esimerkissä siirron kustannus on 5 snt/kWh ja sähköenergian 8 snt/kWh. Lisäksi syötetään sähköenergian vuotuiselle hinnannousulle haluttu prosentti, joka esimerkissä on 2,6 %. Taulukossa 21 havainnollistetaan valolähdevalinnalla saatavaa energiankulutussäästöä kymmenen vuoden ajanjaksolla. Taulukosta on myös luettavissa valaistusratkaisujen tunti- ja päiväkulutus euroissa, joka helpottaa vertailua. Lisäksi voidaan tarkastella sähköenergian hinnannoususta johtuvaa säästöä.

TAULUKKO 21. Energiankulutuksen kustannuskertymä

4	ENERGIANKULUTUS	Hinta snt/kWh	VANHA €	UUSI €	SÄÄSTÖ €
	Siirto	5,00			
	Sähköenergia	8,00			
	Tunti kulutus		0,90	0,33	0,58
	Päivä kulutus		14,47	5,20	9,27
	Vuosi kulutus		3906,49	1404,00	2502,49
	Vuotuinen korotus	2,60 %			
	VUOSI 1	2,60 %	4008,06	1440,50	2567,55
	VUOSI 2	2,60 %	4112,27	1477,96	2634,31
	VUOSI 3	2,60 %	4219,19	1516,38	2702,80
	VUOSI 4	2,60 %	4328,89	1555,81	2773,08
	VUOSI 5	2,60 %	4441,44	1596,26	2845,18
	VUOSI 6	2,60 %	4556,91	1637,76	2919,15
	VUOSI 7	2,60 %	4675,39	1680,35	2995,05
	VUOSI 8	2,60 %	4796,95	1724,03	3072,92
	VUOSI 9	2,60 %	4921,67	1768,86	3152,82
	VUOSI 10	2,60 %	5049,64	1814,85	3234,79
	YHTEENSÄ:		49016,90	17616,77	31400,13

Tarkasteltavana aikajänteenä laskennassa käytetään kymmentä vuotta, jolle laskentatyökalu näyttää energiakustannusten kertymän vuositasolla. Tämä käyttöaika tarkoittaa LED-valaisimelle noin 13,5 tunnin päivittäistä paloaikaa vuoden jokaisena päivänä

kymmenen vuoden ajan, jos käyttöiäksi luvataan LLMF 0,7/50000 tuntia. Tätä käyttöaikaa harvoin saavutetaan kymmenen vuoden aikana, joten LED-valaisinten eliniän jatkuessa valittiin graafinen esitys kuvaamaan elinkaarikustannusten kertymää 15 vuoden aikana.

Takaisinmaksutyökalu ei huomioi LED-valaistusratkaisun uusimista käyttöiän päättyessä, mikäli valaisimiin ei voida vaihtaa LED-moduulia. Vielä hyvin harvat LED-heittimet ja –syväsäteilijät varustetaan vaihdettavalla moduulilla, jolloin valaisinrunko voidaan säästää ja vanha moduuli korvata uudella.

7.3.5 Kunnossapitokustannukset

”Kunnossapitokustannukset”-kohdassa tarkastellaan valaistuksen ylläpito ja huolto/puhdistus kuluja. Kyseessä on arvio valaistukseen kohdistuneista kuluista edellisinä vuosina, kuten valaisimien puhdistus ja lamppujen tai liitäntälaitteiden vaihto. Tähän kohtaan lisätään myös nostinlaitteista ja urakoinnista koituneet laitevuokrat sekä muut vastaavat kulut.

Korvattavaksi eli olemassa olevaksi valonlähteeksi valitaan 150 cm 58W T8 (Osram Lumilux) loistelamppu, jonka kappalehinta on noin neljä euroa. Lamppuja tarvitaan hallin valaisimiin yhteesä 120 kpl. Käyttöiäksi loistelampulle voidaan käyttää 15 000 tuntia ja jakamalla tämä vuotuisella käyttöajalla saadaan lamppujen vaihtoväliksi 3,5 vuotta. Urakoinnissa voidaan laskea ammattilaisen laskuttavan vaihtotyöstä 60€/tunti+nostinvuokra. Loistelamppujen vaihtoon ja valaisinten puhdistukseen voidaan laskea noin 12 tuntia eli arviolta 800 €/vaihto + puhdistus. Kokonaiskustannus jaetaan valonlähteen vaihtovälillä, jotta saadaan vuotuinen kunnossapitoarvio 368,64 €. Taulukossa 22 on esitetty vaihtokustannusten kertymä.

TAULUKKO 22. Valonlähteiden vaihdosta ja puhdistuksesta koituvat kustannukset

VAIHTOKUSTANNUS	
loistelamppu	Osram lumilux
kappalehinta (€)	4
lamppujen määrä (kpl)	120
yhteensä (€)	480
loistelampun käyttöikä (h)	15000
käyttö vuodessa (h)	4320
vaihtoväli (vuotta)	3,5
urakointi (€)	500
valaisimen puhdistus (€)	300
kokonaiskustannus (€)	1280
kunnossapito €/vuosi	368,64

LED-valaistukselle voidaan käytännössä laskea ainoastaan valaisinten puhdistuksesta koituvat kulut, joka käyttöesimerkissä laskettiin 300€/puhdistus kolmen vuoden välein eli 100€/vuosi. Laiteviat ja sammuneet LEDit kuuluvat takuun piiriin 2-5 vuotta, eivätkä näin aiheuta kustannuksia asiakkaalle. Valaistusratkaisuille määritetyt vuotuiset kunnossapitokustannukset sijoitetaan käyttöliittymään, kuten taulukossa 23 on esitetty.

TAULUKKO 23. Vuotuisten kunnossapitokustannusten määrittely

5	KUNNOSSAPITOKULUT/VUOSI	VANHA €	UUSI €	SÄÄSTÖ €
	Huoltokustannus	368,64	100,00	268,64
	YHTEENSÄ:	368,64	100,00	268,64

7.3.6 Takaisinmaksuaika

Laskennan viimeisessä vaiheessa takaisinmaksutyökalu näyttää valaistus uudistuksen takaisinmaksuun kuluvan ajan vuosina. Taulukossa 24 on esitetty käyttöesimerkille määritetty takaisinmaksuaika.

TAULUKKO 24. Takaisinmaksuaika LED-valaistusratkaisulle

6	TAKAISINMAKSUAIKA	2,7	VUOTTA

7.3.7 Käyttöliittymä

Taulukossa 25 on esitetty takaisinmaksutyökalun käyttöliittymä. Näkymä voidaan tulostaa tai yhdistää sähköisen tarjouksen liitteeksi. Laskenta on suoritettu käyttöesimerkin tiedoilla.

TAULUKKO 25. Asiakkaalle tulostettava dokumentti sovituista asioista

FINTRAS

HELSINKI	YLÖJÄRVI	LAHTI
Puh.044 500 6522		
etunimi.sukunimi@fintras.fi		
Hakuninmaantie 5	Menotie 1	Karjalankatu 37
00430 HELSINKI	33470 YLÖJÄRVI	151500 LAHTI

1	TILAN VAATIMUKSET	VANHA	UUSI	Yksikkö
	Valaistusvoimakkuus	300	500	lux

2	LED-VALAISINTEN INVESTOINTIKUSTANNUKSET	MÄÄRÄ (KPL)	HINTA (€)	Teho (kW)
	DL-10/09LED	20	1140,00	0,20
	IL-A100/26LED	8	2082,40	0,80
	FL-B70/34LED	10	2362,00	0,70
	TL-40/42LED	20	2720,00	0,80
	TYHJÄ	0	0,00	0,00
	TYHJÄ	0	0,00	0,00
	YHTEENSÄ:	58	8304,4	2,50

3	KÄYTTÖ JA KUORMA		VANHA	UUSI	Yksikkö
	Käyttöpäiviä vuodessa	270			vrk
	Paloaika päivässä	16			h
	Yhteensä tuntia vuodessa	4320			h
	Valaisinkuorma		7,0	2,5	kW
	Valaistuksen kokonaiskulutus		30049,92	10800	kWh

4	ENERGIANKULUTUS	Hinta snt/kWh	VANHA €	UUSI €	SÄÄSTÖ €
	Siirto	5,00			
	Sähköenergia	8,00			
	Tunti kulutus		0,90	0,33	0,58
	Päivä kulutus		14,47	5,20	9,27
	Vuosi kulutus		3906,49	1404,00	2502,49
	Vuotuinen korotus	2,60 %			
	VUOSI 1	2,60 %	4008,06	1440,50	2567,55
	VUOSI 2	2,60 %	4112,27	1477,96	2634,31
	VUOSI 3	2,60 %	4219,19	1516,38	2702,80
	VUOSI 4	2,60 %	4328,89	1555,81	2773,08
	VUOSI 5	2,60 %	4441,44	1596,26	2845,18
	VUOSI 6	2,60 %	4556,91	1637,76	2919,15
	VUOSI 7	2,60 %	4675,39	1680,35	2995,05
	VUOSI 8	2,60 %	4796,95	1724,03	3072,92
	VUOSI 9	2,60 %	4921,67	1768,86	3152,82
	VUOSI 10	2,60 %	5049,64	1814,85	3234,79
	YHTEENSÄ:		49016,90	17616,77	31400,13

5	KUNNOSSAPITOKULUT/VUOSI	VANHA €	UUSI €	SÄÄSTÖ €
	Huoltokustannus	368,64	100,00	268,64
	YHTEENSÄ:	368,64	100,00	268,64

6	TAKAISINMAKSUAIKA	2,7	VUOTTA

7.3.8 Graafinen esitys

Graafinen esitys takaisinmaksuajasta päivittyy automaattisesti käyttöliittymän tiedoilla. Välilehdellä ”Takaisinmaksuajan grafiikka” voidaan tarkastella elinkaarikustannuskertymää ajan funktiona. Grafiikkaan on mahdollista lisätä myös kilpaileva valaistusratkaisu. Mikäli kilpailevasta tarjouksesta ilmenee hankintahinta, vuotuinen energiankulutus ja arvio kunnossapitokustannuksista, on vertailu mahdollista suorittaa. Käyttöesimerkissä loistelamppuja korvaava ja LEDien kanssa kilpaileva valaistusratkaisu on monimetallivalaisimilla toteutettu hallivalaistus. Taulukkoon 26 on kerätty graafisessa esityksessä tarvittavat lähtötiedot monimetallivalaistukselle.

TAULUKKO 26. Yhteenveto laskennan arvoista

KUSTANNUKSET	VALAISTUS NYT	LED-RATKAISU	KILPAILEVA
Hankintahinta	olemassa	8 304,40 €	3 000,00 €
Kunnossapito	368,64 €	120,00 €	720,00 €
Energiankulutus	3 931,20 €	1 404,00 €	2527,20 €
Takaisinmaksuaika	-	2,7 vuotta	2,8 vuotta

Kilpailevana valaistusratkaisuna käytetään monimetallivalaisimia, joiden investointikustannukset 150 W:n heittimille ovat noin 100 euroa kappale. Tilaan on kaavailtu asennettavan 30 kappaletta monimetallivalaisimia, joten investointikustannus on noin 3000 €. Energiankulutus on täten arvioitu 4,5 kW:n valaistuskuormalle 4320 tunnin vuotuisella käyttöajalla. Laskennassa ei ole huomioitu liitäntälaitehäviöitä. Esimerkiksi Helvarin elektronisilla A2-luokan liitäntälaitteilla hyötysuhde on noin 90 %, joka vastaa 150 W:n monimetallivalaisimelle noin 20 W:n tehohäviötä. Taulukossa 27 on arvioitu monimetallivalaisinten sähköinen kuorma.

TAULUKKO 27. Valaistuskuorman arviointi

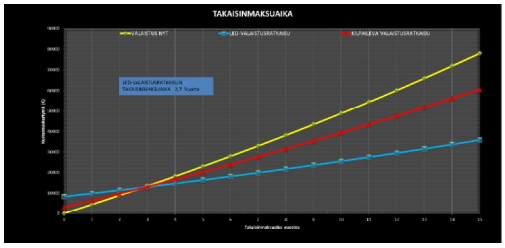
VALAISINKUORMA	
Monimetalli	Lamputyyppi
A2	EEI-luokka
150 W	TEHO
30	Valaisinten lukum.
4500	KUORMA (W)

Taulukossa 28 on määritetty kunnossapidosta koituvat vuotuiset kustannukset.

TAULUKKO 28. Monimetallivalaisinten kunnossapito- ja puhdistusarvio

VAIHTOKUSTANNUS	
monimetallilamppu	Osram HCI-TT 150 W
kappalehinta (€)	40
lamppujen määrä (kpl)	30
yhteensä (€)	1200
lampun käyttöikä (h)	12000
käyttö vuodessa (h)	4320
vaihtoväli (vuotta)	2,8
urakointi (€)	500
valaisimen puhdistus (€)	300
kokonaiskustannus (€)	2000
kunnossapito €/vuosi	720

Kuviossa 69 on esitetty takaisinmaksutyökalun piirtämä elinkaarikustannuskertymä ajan funktiona viidentoista vuoden ajanjaksolla. Siinä esitetään korvattavan valaistusratkaisun elinkaarikustannuksia keltaisella, LED-valaistusratkaisun sinisellä ja monimetallivalaisinten punaisella. LED-valaistuksen ja purkauslamppuvaihtoehdon kustannusten leikkaavan noin kolmen vuoden kohdalla, jonka jälkeen LED-valaistusratkaisu tuo selviä säästöjä vuositasolla. Kyseessä on siis sijoitus, joka tuo säästöjä pitkällä aikajänteellä.



KUVIO 69. Esimerkkikuvaaja takaisinmaksuajan esityksestä